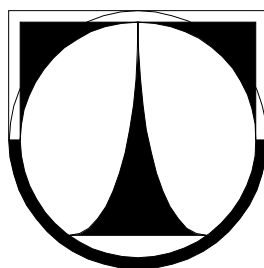


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Liberec 2009

**Jaroslav Antoš**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnické informační a řídicí systémy**

**Termostatická deska s PID regulátorem**

**Test thermostatic board with PID regulator**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Autor: **Jaroslav Antoš**  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Černík, Ph.D.**  
Konzultant: **Ing. Jan Václavík**

Rozsah stran: **46**  
Počet obrázků: **27**  
Počet tabulek: **7**

**V Liberci 1. 2. 2009**

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu práce Ing. Martinu Černíkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při práci a cenné náměty pro zpracování celé práce. V neposlední řadě patří dík Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za poskytnutí podmínek pro měření a konzultantovi Ing. Janu Václavíkovi za odborné rady.

**(Originál zadání)**

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se zabývá stavbou termostatické desky, která je určena k měření teplotních závislostí elektronických prvků a dílů. V teoretické části vysvětluje pojmy z oblasti zobrazení teploty pomocí používaných stupnic. Popisuje typy snímačů teploty, jejich konstrukce, vlastnosti a použití. Dále uvádí základní pojmy v oblasti regulátorů a jejich přechodové funkce. V praktické části jsou provedeny měření časové průběhy teplot realizované termostatické desky pomocí termočlánků. Jsou vyhodnocovány regulační pochody a vlivy na přesnost nastavení. Na závěr byla změřena teplotní závislost závěrných a propustných parametrů Schottkyho diody.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Měření teploty, teplotní snímače , regulace teploty, výroba termostatické desky.

## **ANNOTATION**

This bachelor paper considers the construction of a thermostatic board, which determines the measurement of temperature dependence of electronic elements and parts. The theoreticall part explains terms regarding the area of displaying temperature with the help of scales used. It describes the types of temperature sensors , their construction, qualities and usage. It then introduces the basic terms in the field of regulators and their transitional functions. Measurements, time process of temperature realized thermostatic board by help thermoelement are implemented in the practical part. The regulation procedures and influences on the accurancy of settings are analysed. The thermal dependance of ending and permeable parameters of Schottky's diode was measured at the conclusion.

## **KEY WORDS**

Temperature measuring, thermal senzore, temperature regulation, thermostatic board production.

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

# Obsah

1 ÚVOD.....	8
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	9
2.1 Základní pojmy.....	9
2.2 Snímače teploty .....	10
2.2.1 Odporové kovové snímače .....	11
2.2.2 Odporové polovodičové snímače.....	14
2.2.3 Termoelektrické snímače .....	15
2.2.4 Dilatační snímače.....	17
2.2.5 Tlakové snímače teploty.....	20
2.2.6 Snímače pro bezdotykové měření.....	20
2.3 Schottkyho dioda .....	24
2.4 Regulátory .....	25
2.3.1 Základní pojmy .....	25
2.3.2 Rovnice regulátorů, přechodové funkce a přechodové charakteristiky .....	26
2.3.2 PID regulátor 528.....	28
2.3.3 Solid State Relé.....	29
3 PRAKTICKÁ ČÁST .....	30
3.1 Konstrukce přípravku .....	30
3.2 Měření na přípravku .....	31
3.2.1 Úvod.....	31
3.2.2 Test termostatické desky .....	32
3.2.3 Teplotní zkouška vlivu teplovodivé pasty na přesnost měření.....	34
3.2.4 Vliv funkce autotune na regulační pochod.....	35
3.2.5 Vliv teploty na Schottkyho diodu DCSR3060 v propustném směru .....	38
3.2.6 Vliv teploty na Schottkyho diodu DCSR3060 v závěrném směru .....	40
4 DISKUSE.....	42
5 ZÁVĚR .....	44
6 POUŽITÁ LITERATURA .....	45

# 1 ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá zjišťováním vlivů teploty na vlastnosti elektronických součástek. Teoretická část se zabývá základními pojmy v oblasti zobrazení pomocí teplotních stupnic. Druhý oddíl teoretické části je věnován druhům snímačů teploty, jejich konstrukcím, vlastnostem a použití. Nechybí zde ani přehled regulátorů, jejich funkce a přechodové charakteristiky. Praktická část je věnována nejdříve konstrukci přípravku pro měření a poté různým teplotním testům a jejich detailnímu rozboru.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Základní pojmy

Teplota je fyzikální veličina, která patří mezi základní jednotky SI. Označuje tepelný stav hmoty či tělesa. Naopak teplo je forma energie, která je založena neuspořádanému pohybu elementárních částic, a vyjadřuje tedy změnu stavu. Teplotu měříme tak, že porovnáme teplotu našeho tělesa s definovanou stupnicí. Pro měření používáme dvě základní stupnice:

#### A) Kelvinova (Termodynamická absolutní)

Základní jednotkou teploty je Kelvin, značíme (K). Tuto stupnici měření teploty navrhl skotský matematik a fyzik William Thomson, který byl za své vědecké úspěchy povýšen do šlechtického stavu pod jménem lord Kelvin. Má dva základní body:

0 K - Absolutní nula, nejnižší teplota odpovídající stavu, kdy by ustál termický pohyb elementárních částic.

273,16 K - Trojný bod vody, což je rovnovážný stav všech třech jejích skupenství (Sytá vodní pára, led a voda). Tato teplota je udávána při tlaku  $p=609,8$  Pa.

#### B) Celsiova (Mezinárodní stupnice)

Základní jednotkou je Celsiův stupeň, značíme ( $^{\circ}\text{C}$ ). Tuto stupnici měření teploty navrhl švédský astronom Anders Celsius. Ten stanovil dva pevné body:

$0^{\circ}\text{C}$  - Pro teplotu varu (při tlaku  $p=1013$  hPa).

$100^{\circ}\text{C}$  - Pro teplotu tání (při stejném tlaku  $p=1013$  hPa).

Ovšem Carl Linné stupnici později otočil tak, jak ji známe dnes. Tedy  $0^{\circ}\text{C}$  bod tání a  $100^{\circ}\text{C}$  bod varu. V průběhu let byla doplňována, a její poslední znění má označení ITS90 (The International Temperature Scale of 1990).

Velikost jednotek obou stupnic ( $^{\circ}\text{C}$ , K) je shodná. Protože bod tání ledu má v absolutní stupnici hodnotu  $T = 273,15$  K a v mezinárodní stupnici hodnotu  $J = 0^{\circ}\text{C}$ , souvislost obou stupnic je dána vztahem:

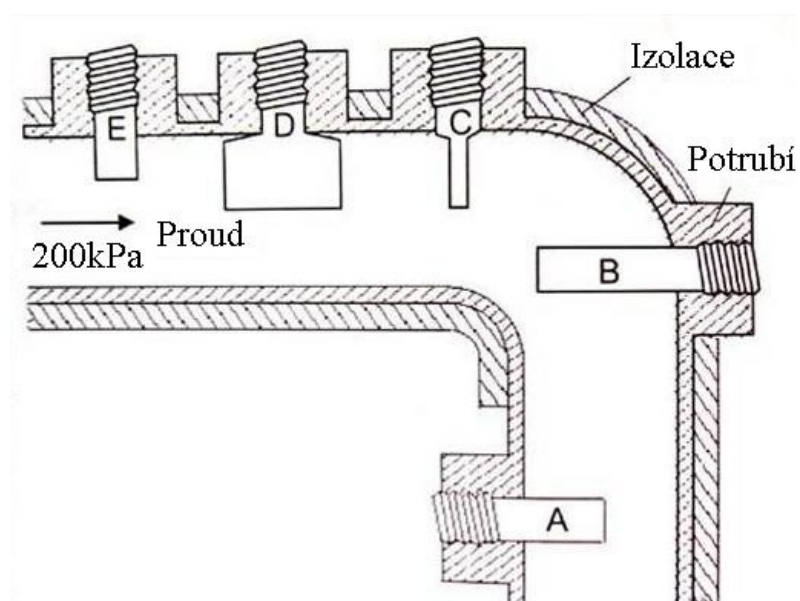
$$T = J + 273,15 \quad (\text{K}), (^{\circ}\text{C}), (^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

Další existující stupnice se nazývá Fahrenheitova. Značíme ( $^{\circ}\text{F}$ ). Dnes se používá výhradně v USA. [1], [2], [3], [4], [5]

## 2.2 Snímače teploty

### Umístění teplotního čidla

Na umístění čidla a úpravě okolního prostředí velice záleží. Je to z důvodů rozložení teplotního pole. Zajímá nás pozice vzhledem k proudění, vzdálenost od stěny a izolace potrubí. Z důvodů přesnosti umísťujeme čidla do jímek podle Obr.1.



**Obr. 1: Umístění teplotního čidla [12]**

Čidlo	Údaj $^{\circ}\text{C}$	Chyba $^{\circ}\text{C}$	Komentář
A	341	45	Neizolované potrubí, špatné obtékání za kolenem
B	386	0	Ideální
C	385	1	Horší obtékání, tenčí stěny = lepší přesnost
D	384	2	Tlustší stěny jímky = horší přenos
E	371	15	Krátká jímka = ochlazování potrubím

**Tab.1: Umístění teplotního čidla [12]**

## Snímání teploty

Teplotu měříme dotykově - čidlo se musí ohřát na teplotu snímaného tělesa, aby došlo k úplnému předání energie. Poté se zjišťují fyzikální změny na čidle. U bezdotykového měření se sledují fyzikální změny na měřeném tělese, nejčastěji vyzařování v infračerveném oboru elektromagnetického záření, nebo změnou odporu (měření teploty vinutí elektromotoru).

### 2.2.1 Odporové kovové snímače

Tyto snímače patří mezi kontaktní. Jejich čidlo (měřicí odpor) převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického odporu. Vlastnosti odporových čidel teploty lze popsat následujícími parametry:

$R_0$  - Základní odpor - hodnota el. odporu čidla při teplotě  $0^\circ \text{C}$ , tj. v bodu tání ledu.

$R_{100}$  - Hodnota elektrického odporu čidla při teplotě  $100^\circ \text{C}$ , tj. v bodu varu vody.

$R_t$  - Hodnota elektrického odporu čidla při teplotě  $t^\circ \text{C}$ .

$W_{100}$  - Poměr odporů při  $100$  a  $0^\circ \text{C}$ .

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (2)$$

$\alpha$ . - Teplotní součinitel odporu materiálu čidla. Je to poměr změny odporu vztažený na jednotkovou změnu teploty.

$$\alpha = \frac{VR}{R_0 \cdot VJ} \quad (\text{K}^{-1}) \quad (3)$$

Teplotní součinitel  $\alpha$  je řádu  $10^{-3} \text{ K}^{-1}$  a pro jednotlivé kovy se moc neliší. Například:

Platina:  $\alpha_{Pt} = 0,00385$ .

Měď:  $\alpha_{Cu} = 0,00426$ .

Nikl:  $\alpha_{Ni} = 0,00618$ .

Pro náš účel je však důležité vybrat takový materiál, aby se parametr  $\alpha$  v žádaném rozsahu teplot neměnil. Jde především o závislost  $\alpha$  při velkých rozsazích hodnot. Pro malé rozsahy můžeme tento parametr zanedbat ( $\alpha = f(J) = \text{konst.}$ ). Záleží na tom jaké

přesnosti chceme dosáhnout. Závislost odporu snímače  $R_J$  na teplotě lze vyjádřit takto:

$$R_J = R_0 \cdot (1 + a \cdot \Delta J) \quad (\Omega) \quad (4)$$

$R_0$  - Základní odpor snímače na počátku měřicího rozsahu.

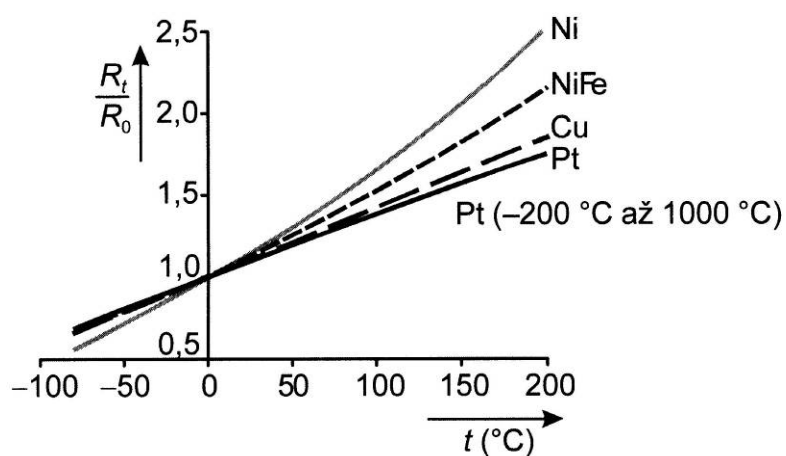
V případě přesného měření, nebo velkého rozmezí teplot je nutné uvažovat zmíněnou závislost  $a = f(J)$ . Pro teplotní rozsah  $-200^\circ\text{C}$  až  $0^\circ\text{C}$  se používá tento vztah:

$$R_J = R_0 \{1 + a \cdot \Delta J + b \cdot \Delta J^2 + g \cdot \Delta J^3 \cdot (J - 100)\} \quad (\Omega) \quad (5)$$

Pro teplotní rozsah  $0^\circ\text{C}$  až  $+850^\circ\text{C}$  se používá tento vztah:

$$R_J = R_0 \{1 + a \cdot \Delta J + b \cdot \Delta J^2\} \quad (\Omega) \quad (6)$$

Nevýhoda odporových snímačů je velká časová konstanta, daná umístěním odporového materiálu do ochranných vrstev.

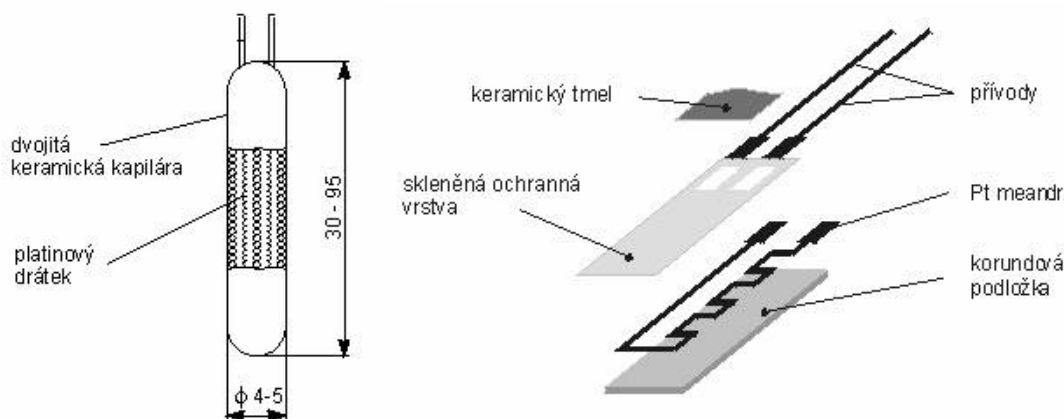


Obr. 2: Teplotní závislost odporových snímačů [7]

### Platinová čidla Pt100

Nejdůležitější požadavek kladený na tato čidla je stálost hodnoty (kalibrace). Té lze dosáhnout použitím přesných odporů, pečlivým výběrem odporového materiálu,

robustní konstrukcí bez pnutí, pozorně sledovaným tepelným zpracováním a procesem stárnutí. Aby bylo možné dosáhnout optimální spolehlivosti těchto čidel, doporučuje výrobce každoroční kalibraci. Pro přesné měření je zapotřebí kompenzace odporu vinutí, ta se řeší tří, nebo čtyřvodičovou metodou. Konstrukce se provádí napařením tenké vrstvy platiny na keramický substrát (viz Obr.3). Pomocí laseru je odpor snímače přesně nastaven na jmenovitou hodnotu (Pt100, Pt500, Pt1000). Aktivní vrstva je obklopena izolační vrstvou, která chrání senzor proti vnějšímu chemickému a mechanickému poškození. Kapka fixující dva vývody dlouhé 10 mm je také z keramiky. Vývody jsou z pozlaceného niklu a jsou obdélníkového průřezu. Standardně jsou k dispozici čidla ve třídách přesnosti A a B. Stabilitu čidel popisuje výrobce následovně: Používáme-li tato čidla průběžně při 400°C po dobu 300 hodin, je případná odchylka od normálu při 0°C do 0,008 W, tzn. maximálně 0,02°C. Výrobce doporučuje používat čidla v rozmezí od - 50°C do + 500°C. V praxi se jeví ideální (z hlediska linearit) pracovní rozsah od 0°C do 400°C pro třídu A a od 0°C do 500°C pro třídu B. Základní balení je 10 kusů. Na každém základním obalu je uvedena odporová hodnota ve W při 0°C. Tzn., že zákazník obdrží téměř stejná čidla dané třídy přesnosti. Tato skutečnost slouží k úspoře času, práce a tím i dalších nákladů na danou aplikaci.



**Obr. 3: Příklad možné konstrukce čidla Pt100 [12]**

### Niklová čidla

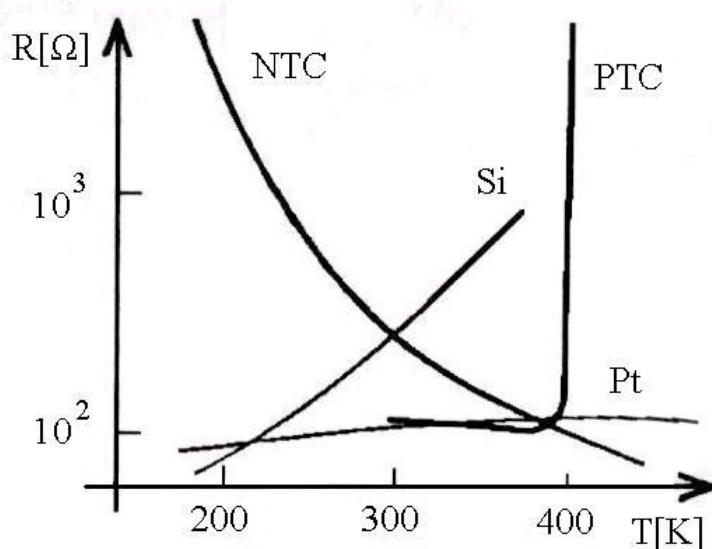
Výhodou oproti platinovým je velká citlivost, rychlost (malá časová konstanta), malé rozměry a cena. Naopak nevýhodou je menší teplotní rozsah, nelinearita (oproti platině, viz Obr.2), menší stabilita po delším čase, a menší odolnost vůči prostředí. Při překročení teploty 300°C dochází ke změně odporu čidla, dojde tak k jeho znehodnocení. Používají se pro menší rozsahy v -60°C ÷ 200 °C. Vyrábějí se buď jako

tenkovrstvá nebo tlustovrstvá. Čidla se pokrývají ochranným lakem, a vkládají do sond. Podobně jako platinová čidla se kromě základní hodnoty odporu  $r_{100} = 100 \, \Omega$  vyrábějí snímače se základní hodnotou odporu 200, 500, 1000 a 2000  $\Omega$ . [1],[6],[7],[8],[9], [20]

## 2.2.2 Odporové polovodičové snímače

### Negastory

Značíme NTC (Negative Temperature Koeficient). Koeficient  $\alpha$  (teplotní součinitel odporu) nabývá záporných hodnot. Vyrábějí se práškovou technologií ze směsi oxidů kovů. Ze statických charakteristik různých odporových snímačů teploty jsou vidět značné rozdíly závislosti odporu na teplotě. Viz Obr.4.



**Obr. 4: Statické charakteristiky odporových snímačů teploty [1]**

Měrný odpor negastorů je řádu  $10^{-1} \div 10^{-3} \, \Omega \, \text{m}^{-1}$ . Závislost odporu na teplotě  $T$  má exponenciální průběh, lze vyjádřit tímto vztahem:

$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \, (\Omega) \quad (8)$$

$A(\Omega)$  - Konstanta zahrnující geometrický tvar materiálu. Vyjadřuje odpor při nekonečně vysoké teplotě.

$B(K)$  - Materiálová teplotní konstanta. Pro standardně užívané vyjádření odporu NTC na teplotě musíme teploty  $T_0$ ,  $T_1$  navzájem podělit a tím získáme tento vztah:

$$R_1 = R_0 \cdot e^{\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T_0}\right)} \quad (\Omega) \quad (9)$$

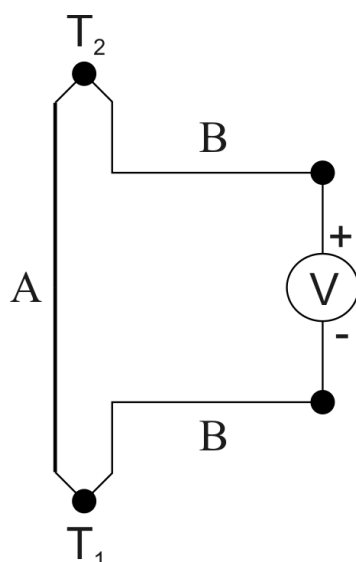
$R_0$  - Známá hodnota odporu při definované teplotě  $T_0$ . Negastory jsou vhodné pro bodové měření díky malým rozměrům. Pro větší citlivost jsou vhodné k měření malých změn teploty. Součinitel odporu negastorů je o jeden řád vyšší než u kovů. Nevýhodou je nelineární (exponenciální) průběh charakteristiky, malá časová stálost a poškození při přehřátí. Nejsou tedy vhodné pro přesné měření teploty a cejchování na malých rozsazích měřené teploty

### **Pozistory**

Pozistory se označují jako PTC (Positive Temperature Coefficient). Po dosažení Curioho teploty koeficient  $\alpha$  naopak nabývá kladných hodnot, viz Obr.4. Vyrábějí se z polykrystalické feroelektrické keramiky. Odpor se stoupající teplotou nejprve mírně klesá, pak nad Curiovou teplotou prudce roste a pak opět mírně klesá. Používají se jako dvoustavové senzory. Oblast nárůstu odporu lze ovlivňovat chemickým složením, takže lze vyrobit sadu teploměrů s navazujícími teplotními rozsahy v rozmezí  $40 \div 180^\circ\text{C}$  odstupňovanými po  $10^\circ\text{C}$ . Používají se proto pro citlivá měření v definovaných úzkých rozsazích. [1],[11],[12]

### **2.2.3 Termoelektrické snímače**

Jsou založeny na Seebeckově (termoelektrickém) jevu, který zjednodušeně říká: Na rozhraní dvou materiálů dochází k difúzi elektronů, což znamená, že nositelé náboje teplejšího vodiče mají větší energii a difundují do chladnější oblasti. Tím se vytvoří potenciál. Velikost potenciálu je závislá na teplotě a kombinaci materiálů. Spoj může být svařen, spájen nebo zakroucen.



**Obr. 5: Seebekův jev [12]**

Vytvoříme-li uzavřený obvod ze dvou vodičů různých materiálů podle Obr.5, a jejich spoje umístíme do prostředí s různými teplotami  $T_1$ ,  $T_2$ , pak napětí změřené při rozpojeném elektrického obvodu bude funkcí rozdílu teplot  $T_1 - T_2$ . Matematicky můžeme vyjádřit velikost napětí pro malé teplotní rozsahy vztahem:

$$U = a \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{mV} \cdot \text{mVK}^{-1}, \text{K}) \quad (10)$$

kde  $a$  je termoelektrický koeficient (závislý na materiálu a střední teplotě spoje). U vodičů nabývá řádově jednotky mV na 100 °C a u polovodičů o jeden řád vyšší. Podle svých termoelektrických vlastností jsou kovy sestaveny do termoelektrické řady, jejímž základem je platina. V praxi se používá vybraná řada termočlánků, viz Tab.2.

Označení termočlánku	Složení	Měřicí rozsah (°C)
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700

**Tab. 2: Základní termočlánky a jejich rozsahy [13]**

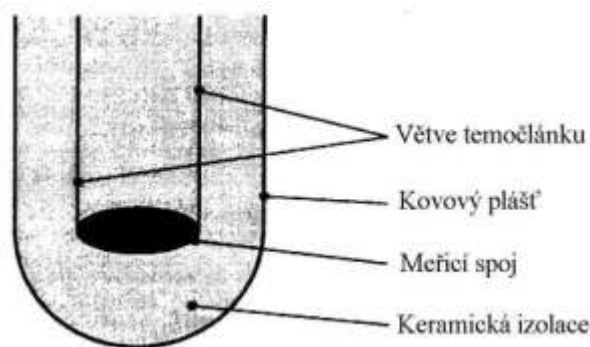


### Drátové termoelektrické čidlo

Je tvořeno kovovými větvemi (vodiči) uloženými v izolačních trubičkách, které slouží, jak k ochraně proti vlivům vnějšího prostředí, tak především k elektrické izolaci obou větví. Izolačních trubičky mohou být podle rozsahu provozních teplot vyrobeny z plastu, skla nebo keramiky. Ochrana proti okolnímu prostředí může být ještě zvýšena uložením termočlánu v keramické nebo kovové trubce. Jako drátové se obvykle používají termočlánu z drahých kovů "S" a "B" o průměru větví 0,5 nebo 0,35 mm a termočlánu z obecných kovů "J", ("L") a "K" s velkým průměrem větví, např. 3,2 mm.

### Plášťové termoelektrické čidlo

Větve těchto termočlánu jsou uloženy ve zhuštěné minerální izolaci obvykle z oxidu  $MgO$ , nebo  $Al_2O_3$ . Obojí je uzavřeno v kovovém plášti ve tvaru trubky. Vnější průměr tohoto pláště (trubky) je v rozsahu cca (0,25 až 12)mm. Konce termočlánuvých vodičů se svaří a obsypou izolační hmotou. Izolované provedení lze vidět na Obr 6. Jeho předností je malá časová konstanta, z montážního hlediska ohebnost. Na svorkovnicích je v obou provedeních vyznačena polarita a materiálové složení článku.



Obr. 6: Plášťové termoelektrické čidlo (izolované provedení) [13]

[1],[12],[13]

### 2.2.4 Dilatační snímače

Tyto snímače využívají roztažnosti látek při změně teploty. Použité látky mohou být ve skupenství pevném, kapalném nebo plynném. Při změně teploty látky dochází ke změně rozměru. Součinitel teplotní roztažnosti nám vyjadřuje rozměrovou změnu při zahřátí či ochlazení. Mezi základní druhy patří kapalinové a kovové.

## Kapalinové snímače

U těchto čidel se využívá roztažnosti rtuti ( $-39$  až  $360^{\circ}\text{C}$ ), alkoholu ( $-110$  až  $50^{\circ}\text{C}$ ), pentanu ( $-200$  až  $20^{\circ}\text{C}$ ) či toluenu ( $-70$  až  $100^{\circ}\text{C}$ ). Ovšem nevýhodou pro automatizaci je absence elektrického výstupu. Ta se řeší doplněním dvojicí kontaktů z platiny, teploměr pak slouží jako teplotní spínač.

## Kovové snímače teploty

Tyčový snímač využívá dilataci (roztažnost) trubky, u které je jeden konec pevně přichycený a druhý je volný. Přitom platí tento lineární vztah:

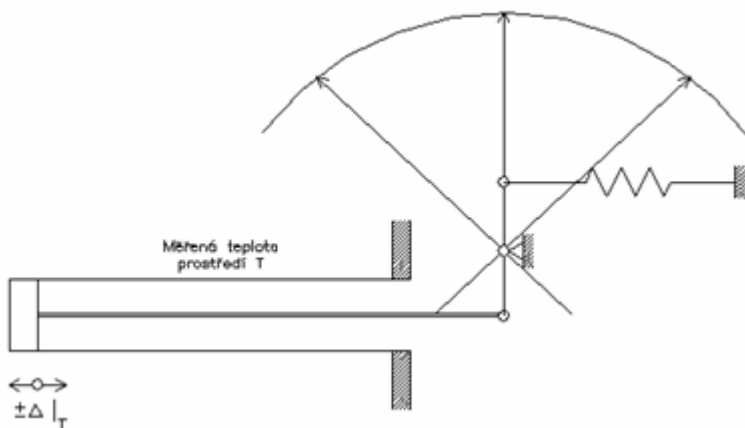
$$l_{T_1} = l_{T_0} \cdot [1 + a(T_1 - T_0)] \quad (\text{m}) \quad (11)$$

kde  $a \text{ (K}^{-1}\text{)}$  je teplotní součinitel roztažnosti použitého materiálu trubky.

$l_{T_0}$ ,  $l_{T_1}$  (mm) jsou délky trubky při teplotách  $T_0$ ,  $T_1$ . Přírůstek teploty potom můžeme vyjádřit takto:

$$\Delta T = T_1 - T_0 = \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{l_{T_1}}{l_{T_0}} - 1 \right) \quad (\text{K}) \quad (12)$$

Dilatace trubky závisí tedy nejen na materiálu (používají se materiály s vysokou hodnotou koeficientu  $a$  například bronz či mosaz), ale i na její délce. To může být problémem při bodovém měření. Musíme brát v úvahu, že trubka měří v celé své délce a výsledkem měření je průměrná teplota prostředí. Častá konstrukce je na Obr. 7 ze které vyplívá, že převodový mechanismus by neměl na teplotu reagovat tak jako měřicí trubka. Používá se například křemen s malou  $a$ .



Obr. 7: Tyčový teploměr [10]

Nevýhodou je malá citlivost, ale výhodou je velká přestavná síla, která se dá využít k přímému ovládání akčních členů regulátorů.

### Bimetalové snímače teploty

Funkce je založena na různé teplotní roztažnosti kovů. Po spojení svařením nebo spájením těchto různých kovů, nejčastěji ve formě dvou pásků, a následném zafixování jednoho konce vznikne teplotní čidlo. Viz Obr.8. Bimetalový snímač je navinut do oblouku nebo spirály. Při změně teploty se změní poloměr křivosti. Materiál s větší roztažností je na vnější straně. Výchylka  $\Delta l$  druhého (volného) konce je funkcí teplotní změny podle vztahu:

$$\Delta l = k \cdot (T_1 - T_0) \cdot \frac{l^2}{t} \quad (\text{m}) \quad (13)$$

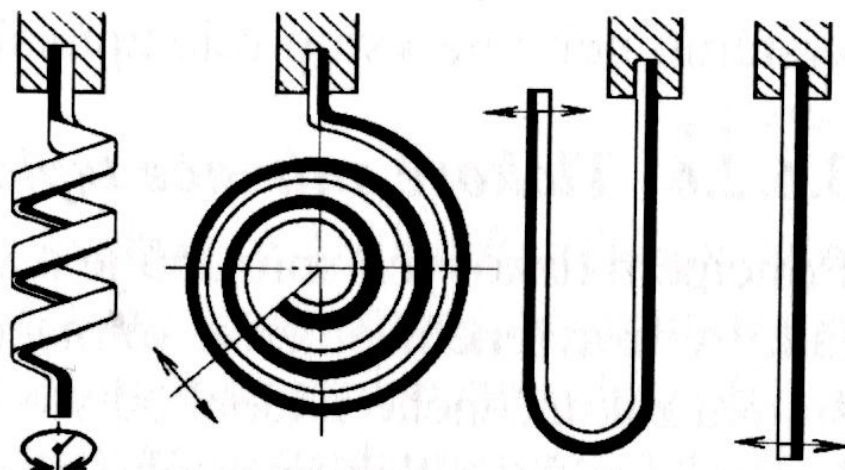
Kde  $k \text{ (K}^{-1}\text{)}$  je součinitel prohnutí daný použitou materiálovou dvojicí

$T_1 - T_0 \text{ (K)}$  je rozdíl měřené a počáteční teploty (oteplení dvojkovu)

$l \text{ (mm)}$  je účinná délka pásku dvojkovu

$t \text{ (mm)}$  je tloušťka pásku dvojkovu

Nejčastější užití je ve funkci nadproudové ochrany jističů proudu a k jejich ovládání.



**Obr. 8: Konstrukce bimetalového čidla [1]**

[1] , [14]

### 2.2.5 Tlakové snímače teploty

Jejich principem je změna tlaku v nádobě při změně teploty v uzavřeném objemu. Jsou složeny ze stonku, který má na konci nádobku. Ta je umístěna do měřicího prostoru. Další částí je spojovací trubice-kapilára, a na konci je tlakoměrný převodník složený z membrány nebo vlnovce. Podle náplně rozdělujeme tyto snímače na kapalinové, parní a plynové.

#### Plynové teploměry

Využívají stavové rovnice ideálního plynu:

$$p_1V = mRT_1 \quad (14)$$

$$p_2V = mRT_2 \quad (15)$$

Kde  $V$  je objem jímky,  $m$  hmota náplně,  $R$  plynová konstanta a  $T_1$  a  $T_2$  jsou absolutní teploty. Vzhledem k tomu, že hmota a objem náplně jsou stále konstantní, můžeme po úpravě psát:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (16)$$

### 2.2.6 Snímače pro bezdotykové měření

Měření teploty spočívá ve vyhodnocení energie elektromagnetického záření vysílaného povrchem měřeného tělesa. Původně byly označovány jako radiační pyrometry a jejich použití bylo limitované měřicím rozsahem pouze pro vysoké teploty. Používaly se pro měření vysokých teplot, pokud nebylo možné zavést kontaktní čidlo. Dnes je zavedený název pyrometr a rozsah měřicích teplot se zvětšil, dokonce lze měřit i teploty pod  $0^\circ\text{C}$ . Hodí se například v aplikacích, kde měříme teplotu rotujících částí, například u motoru nebo částí, které jsou pod nebezpečným elektrickým proudem. Jak už bylo řečeno na začátku, pyrometry vyhodnocují tepelné záření. Část tepelné energie látek se neustále přeměňuje v energii, kterou tyto látky vysílají ve formě elektromagnetického záření. Při rovnováze mezi energií přijímanou a vysílanou může být stav záření charakterizován určitou teplotou. Vysílané záření se nazývá tepelné a je složeno z různých vlnových délek. Intenzita vyzařování  $H$  je dána vztahem:

$$H = \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (17)$$

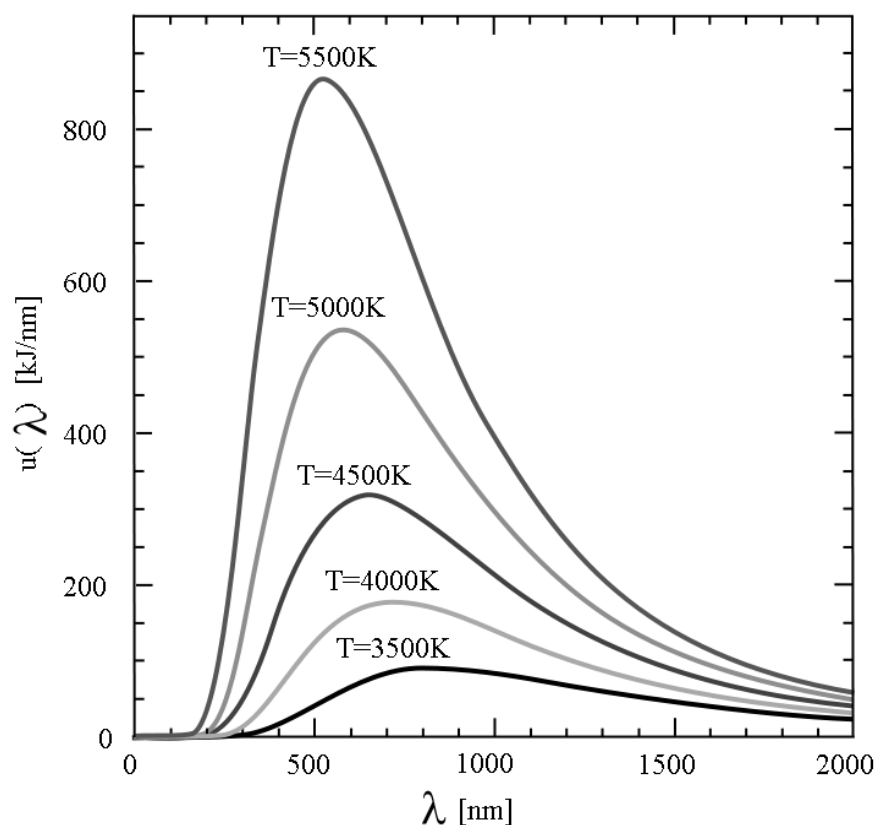
Kde  $\Phi$  (W) je zářivý tok a  $S$  ( $\text{m}^2$ ) plocha povrchu zdroje záření. Dokonale černé těleso je schopno vyzařovat a pohlcovat všechno dopadající záření. Je-li teplota tělesa větší než teplota okolí, převažuje intenzita vyzařování nad pohltivostí. Intenzita vyzařování dokonale černého tělesa  $H_0$  podle Stefan-Boltzmannova zákona závisí jen na jeho absolutní teplotě a je úměrná její čtvrté mocnině:

$$H_0 = s \cdot T^4 \quad (\text{Wm}^{-2}, \text{K}^{-4} \text{Wm}^{-2}, \text{K}^4) \quad (18)$$

Kde  $s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-4} \text{ Wm}^{-2}$  (Stefan-Boltzmannova konstanta). Stefan-Boltzmannův zákon nepopisuje vyzařování černého tělesa úplně, protože nevystihuje jeho spektrální rozložení. Závislost intenzity záření  $I_{IT}$  na vlnové délce  $I$  a teplotě  $T$  černého tělesa  $I_{IT} = f(I, T)$  je dána Planckovým zákonem:

$$H_{0I} = \frac{c_1 \cdot I^{-5}}{e^{\frac{c_2}{IT}} - 1} \quad (\text{Wm}^{-3} \text{Sr}^{-1}) \quad (19)$$

Kde konstanty  $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ (W m}^2 \text{)}$  a  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ (mK)}$  Graficky je tato funkce znázorněna na Obr.9. Plocha pod křivkou pro danou teplotu je rovna intenzitě vyzařování  $H_0$  při této teplotě. Maximum vyzařování se posouvá se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám.



**.Obr. 9: Vyzářovací charakteristiky [23]**

### Emisivita

Je schopnost předmětu vysílat elektromagnetické záření. Hodnota se pohybuje v rozsahu od 0 do 1. Hodnoty 1 dosahuje absolutně černé těleso, které veškerou energii vyzaří, naopak těleso, které nevyzařuje žádnou energii, dosahuje hodnoty 0. Nejdokonalější pyrometry měří jak emisi, tak i emisivitu objektu, zatímco jiné pyrometry požadují po uživateli zadání emisivity jako vstupní hodnoty. Viz Tab.3. Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii ideálně černého tělesa při stejné teplotě. Závisí na materiálu, úpravě povrchu, oxidaci povrchu a obecně platí vztah:

$$e = f(I, T) \quad (20)$$

Ve vztahu k emisivitě  $\epsilon$  resp.  $\epsilon_\lambda$  je i odrazivost (reflektance)  $\rho$ ,  $\rho_\lambda$ , což je míra schopnosti odrazet záření a prostupnost (transmitance)  $t$ ,  $t_\lambda$  jako míra schopnosti propustit záření. Je-li objekt ve stavu tepelné rovnováhy, nedochází k žádnému ohřívání ani ochlazování.

Energie, která se vyzařuje musí být rovna energii pohlcované, takže emisivita  $\varepsilon$  se rovná pohltivosti (absorbtanci)  $\alpha$ . Potom platí tento vztah:

$$e + r + t = 1 \quad (21)$$

<b>Materiál</b>	<b>Emisivita</b>
Oxidovaný hliník	0,2-0,4
Keramika	0,95
Sklo	0,85
Voda	0,93
Dřevo	0,9 – 0,95
Papír, všechny barvy	0,95
Olovo	0,2 – 0,6
Zlato	0,01 – 0,1

**Tab. 3: Tabulka emisivity [24]**

#### **Výhody pyrometrů:**

Možnost měření objektů, které se pohybují, snadné měření teploty na obtížně dostupných místech, rychlost, možnost měřit vysoké teploty, neovlivnění měřeného objektu.

#### **Nevýhody pyrometrů:**

Měří se pouze povrchová teplota materiálů a je nutné brát v úvahu jejich emisivitu, objekt tedy musí být pro teploměr opticky viditelný. Nutnost ochrany čidla před prachem a kondenzujícími kapalinami.

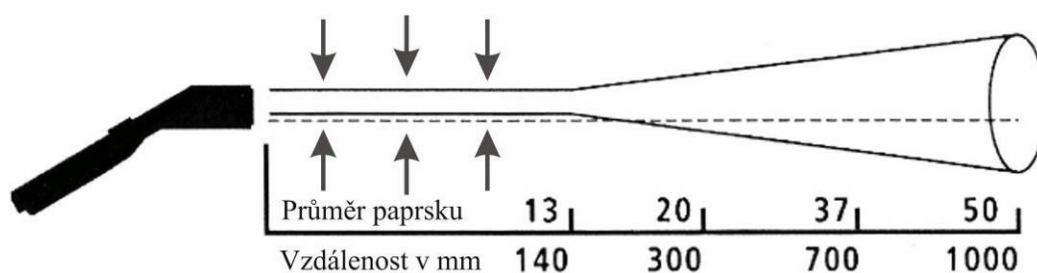
#### **Detektory pyrometrů**

Používají se termické (např. bolometr, pyroelektrické senzory nebo termické proužky z termočlánků) nebo fotoelektrické detektory (nechlazené nebo chlazené fotodiody). Čočka nebo okénko pro přístroje pracující na základě měření infračervených paprsků je ze skla nebo z křemenného skla. Při detekci středního a dlouhého

infračerveného záření je detekční optika pyrometru složena z polovodičových monokrystalů, Ge Si.

### GIM 530 MS

Bezdotykový teploměr od firmy Greisinger electronic GmbH. Přístroj měří intenzitu infračerveného záření, které vyzařuje měřený objekt a vypočítává z ní povrchovou teplotu měřeného předmětu. Laserový zaměřovač pomáhá se zacílením měřeného objektu. Měřicí paprsek má průměr 13mm ve vzdálenosti 140mm. Velikost měřeného místa se zvětšuje s rostoucí vzdáleností. Ve vzdálenosti 1m má měřené místo průměr 50mm. Poměr mezi vzdáleností a velikostí měřené plochy se nazývá optické rozlišení a je přibližně 20:1 v ohnisku ve vzdálenosti do 1m. Ve větší vzdálenosti se dělí číslem 20. viz Obr10



**Obr. 10: Optický diagram GIM 530 MS [24]**

[15],[16],[17],[18]

## 2.3 Schottkyho dioda

Schottkyho dioda využívá usměrňujících účinků styku kov polovodič. Jako polovodič se používá křemík a pro kov zlato či hliník. Její rychlost vzniku hradlové vrstvy se využívá pro usměrnění vysokých frekvencí. Oproti diodám s PN přechodem dioda vykazuje menší napětí v propustném směru. Výhodou proti hrotovým diodám je také vyšší mechanická odolnost a kratší tzv. zotavovací doba. Vliv teploty na průběh výkonu je probírán v praktické části 3.2.5. [28]



## 2.4 Regulátory

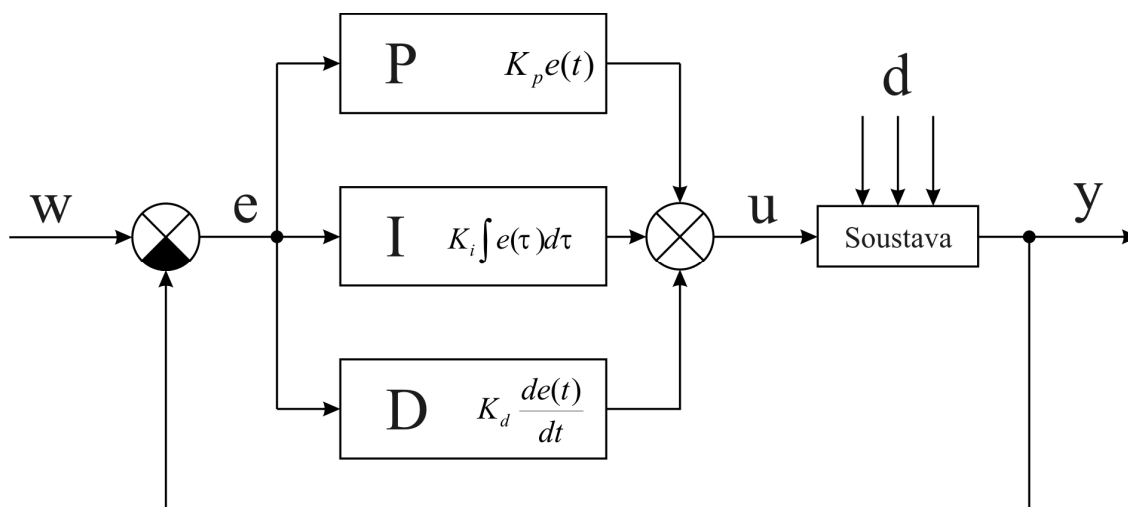
### 2.3.1 Základní pojmy

Regulátor je hlavní část řídicího systému, která vyhodnocuje a následně řídí zdrojovou část tak, aby byly splněny požadované vnitřní funkce. Na výběr máme ze tří základních typů: a) dvoupolohové (zapnuto/vypnuto)

b) proporcionální

c) PID (proporcionálně, integračně derivační), případně PI,PD

V první řadě musíme zvolit vstupní signál, vycházíme z požadovaných měřicích rozsahů. U regulátorů určených pro nastavování teploty jsou to již zmíněné snímače teploty v kapitole 2.2. V druhé řadě si musíme ujasnit, jakým způsobem bude ovládán výstupní akční člen (např. relé nebo analogový výstup). Po té zvolíme daný typ regulátoru, a požadovanou funkci (např. topení, chlazení či maximální, nebo minimální limit). Pro náš přípravek byl použit PID regulátor 528, tomu se budeme zvlášť věnovat v další kapitole.



Obr. 11: Základní blokové schéma regulačního obvodu [19]

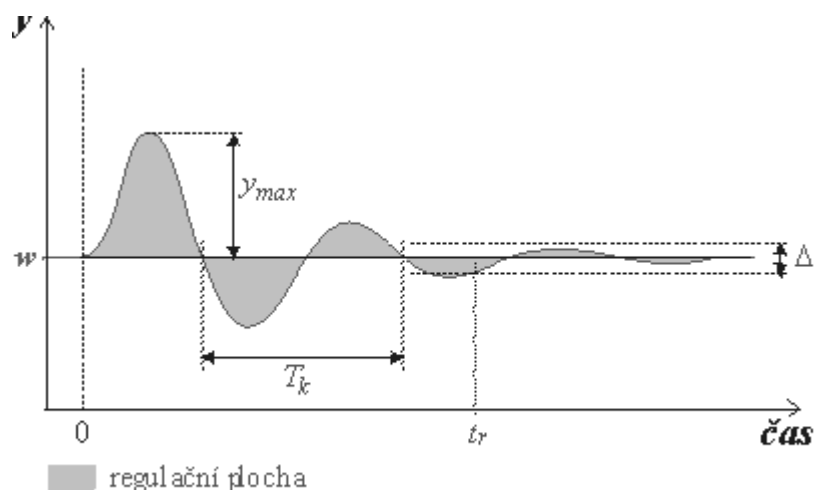
w – Řídicí veličina

e – Regulační odchylka ( $e = w - y$ )

u – Akční veličina

y – Regulovaná veličina

d – Poruchová veličina



**Obr. 12: Regulační pochod [25]**

$w$  – Žádaná hodnota

$t_r$  – Doba regulace, měří se do chvíle, kdy hodnota regulované veličiny zůstane trvale v určeném intervalu (volí se obvykle  $\pm 5\%$  žádané hodnoty).

$y_{\max}$  – Největší odchylka regulované veličiny od žádané hodnoty během regulačního pochodu

$T_k$  – Perioda kmitů (pokud je regulační pochod kmitavý)

Regulační plocha – Integrál z regulační odchylky podle času, snažíme se o co nejmenší

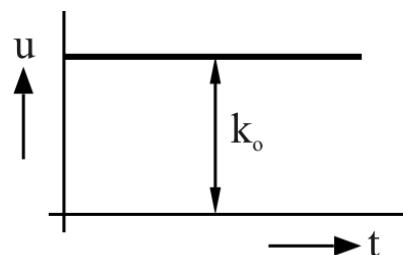
### 2.3.2 Rovnice regulátorů, přechodové funkce a přechodové charakteristiky

#### Regulátor typu P – ideální

Základní rovnice regulátoru:  $u = k_0 e$

Přechodová funkce:  $u(t) = k_0$

Přechodová charakteristika:

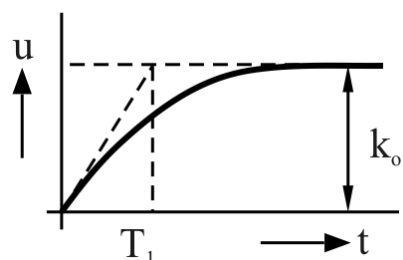


#### Regulátor typu P – se zpožděním 1.řádu

Základní rovnice regulátoru:  $T_1 \frac{du}{dt} + u = k_0 e$

Přechodová funkce:  $u(t) = k_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$

Přechodová charakteristika:

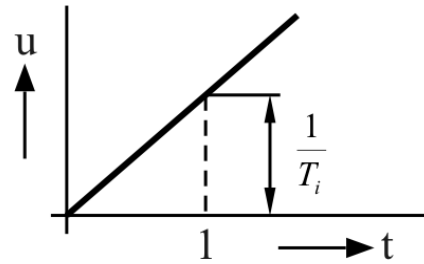


### Regulátor typu I – ideální

Základní rovnice regulátoru:  $u = \frac{1}{T_i} \int e dt$

Přechodová funkce:  $u(t) = \frac{1}{T_i} t$

Přechodová charakteristika:

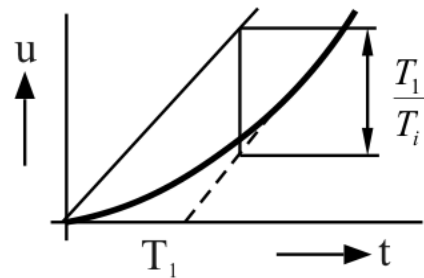


### Regulátor typu I – se zpožděním 1.řádu

Zk. rovnice regulátoru:  $T_1 \frac{du}{dt} + u = -\frac{1}{T_i} \int e dt$

Přechodová funkce:  $u(t) = \frac{t}{T_i} - \frac{T_1}{T_i} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$

Přechodová charakteristika:

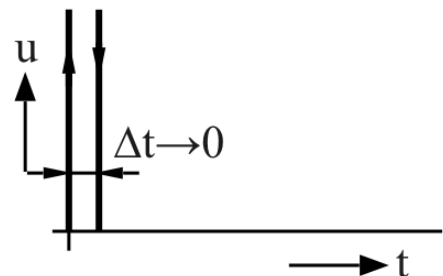


### Regulátor typu D – ideální

Základní rovnice regulátoru:  $u = T_d \frac{de}{dt}$

Přechodová funkce:  $u(t) = d(t)$

Přechodová charakteristika:

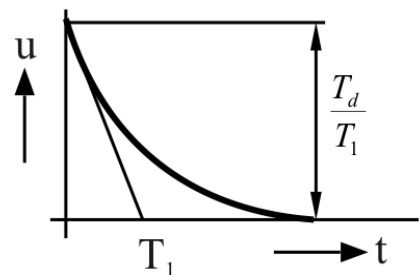


### Regulátor typu D – se zpožděním 1.řádu

Základní rovnice regulátoru:  $T_1 \frac{du}{dt} + u = T_d \frac{de}{dt}$

Přechodová funkce:  $u(t) = \frac{T_d}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}}$

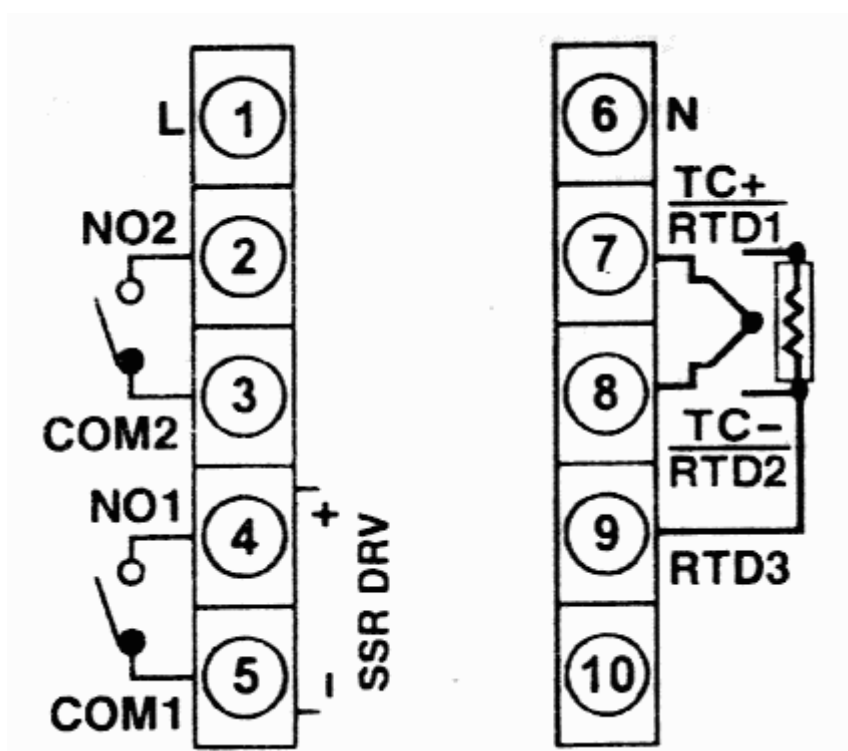
Přechodová charakteristika:



[25]

### 2.3.2 PID regulátor 528

PID regulátor 528 slouží k přesnému řízení a sledování tepelného regulačního pochodu. Jako vstup lze použít různé druhy snímačů, viz Tab.4. Rozlišení teploty je na desetinná čísla. Důležitou funkcí je samonastavovací režim auto tune, který automaticky měří, počítá a nastavuje oblast proporcionality (P), integrační dobu (I), a derivační čas (D). Při samonastavování regulátor tedy provádí proporcionální řízení a určuje vhodné P,I,D hodnoty. Další možností je i ruční vložení jednotlivých složek P,I,D. Zapojení vstupů, výstupů a napájení je patrné z Obr.13. Pro náš případ jsou použity vstupy 7,8,9 pro třívodičové připojení odporového čidla PT100 a výstupy 4,5 pro spínání solid state relé.



Obr.13: Vstupy, výstupy a zapojení PID 528 [27]

- 1 – napájení fáze –L
- 2 – kontakt relé 2 – NO2
- 3 – kontakt relé 2 – COM
- 4 - kontakt relé 1 – NO1
- 5 – kontakt relé 1 - COM

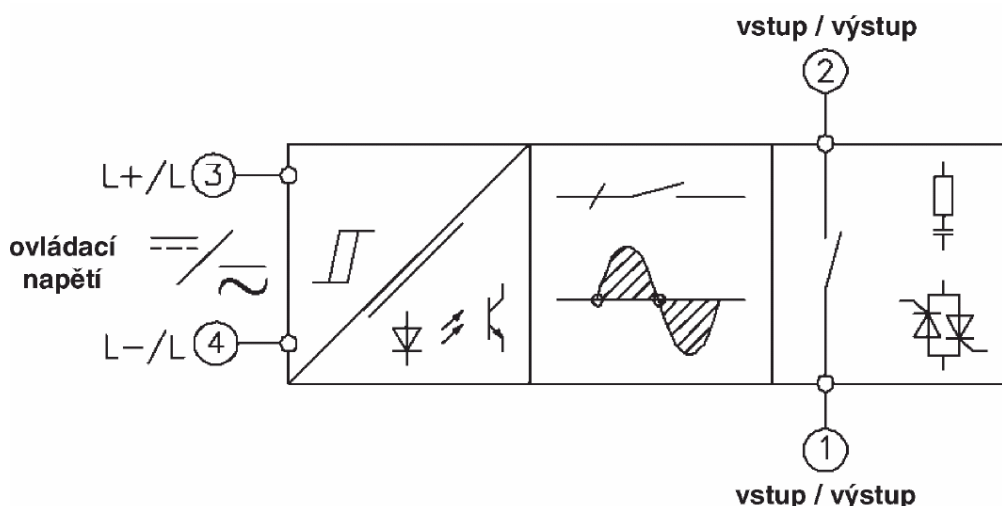
- 6 – napájení prac.zem - N
- 7 – kladný vývod termočláunku nebo Pt 100
- 8 - záporný vývod termočláunku nebo Pt 100
- 9 – třetí vývod Pt 100

Typ čidla	Teplotní rozsah (°C)	Rozlišení (°C)
J	-99 až 750	0,1
K	-99 až 1350	0,1
T	-99 až 400	1
R	-99 až 1750	1
S	-99 až 1750	1
RTD	-99 až 850	0,1

**Tab. 4: Teplotní rozsahy vstupních čidel [27]**

### 2.3.3 Solid State Relé

Elektronické polovodičové relé (Solid State Relay = relé v pevné fázi) je součástka, jejíž uplatnění se původně uvažovalo ve výkonových aplikacích, kde tato elektronická relé měla nahrazovat relé mechanická, a to zejména z důvodů malé životnosti mechanických kontaktů, rozpínajících většinou zátěž indukčního typu. Pro spínání výstupu bylo použito solid state relé (Cosmo KSD210AC8 250VAC/1 x 10 A; 4-32 VDC; 1f). Podle blokového diagramu z Obr.14 lze vidět stejnosměrné ovládací vstupní napětí na svorkách 3 a 4. Svorky 1 a 2 jsou pro výstupní obvod, ve kterém je termostatická deska. Výhodou SS relé je spínání v nule, které je znatelné v druhém bloku diagramu na Obr.29.



**Obr. 14: Blokový diagram SSR [22]**

[21] ],[22]



## Výroba termočlánku

K výrobě termočlánku byly použity materiály měď a konstantan. Ke spojení bylo použito sváření na proudovém zdroji Hewlett Packard – 6030A Systém power supply (0-200V/0-17A, 1000 W) při proudu 15A. Pomocí srážecího odporu Tesla TR 553 ( $4,7\text{K}\Omega$ ) a měděného plíšku byl vytvořen elektrický výboj, a došlo tak ke svaření mědi a konstantanu v místě přechodu.

## 3.2 Měření na přípravku

### 3.2.1 Úvod

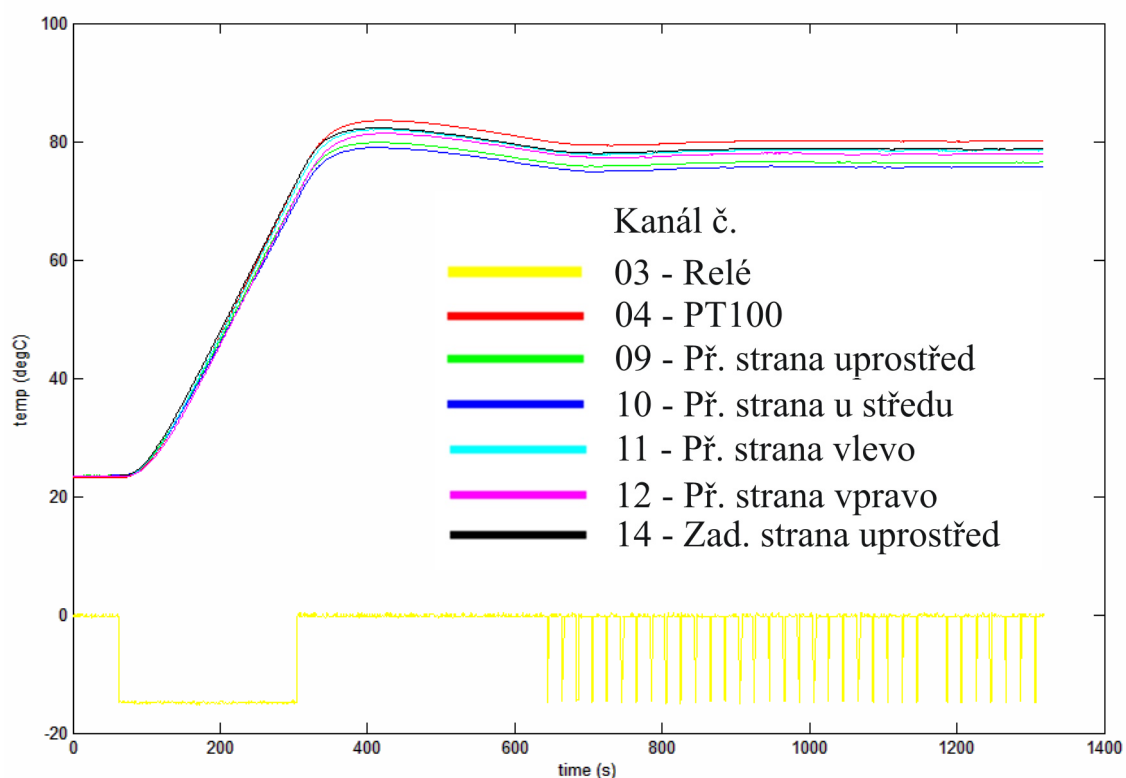
V prvním kroku byla provedena teplotní zkouška na  $80^\circ\text{C}$ , po té na  $120^\circ\text{C}$  a nakonec na  $200^\circ\text{C}$ . Pro teplotu  $80^\circ\text{C}$  byla navíc provedena zkouška teplovodivé pasty mezi otvorem pro čidlo a samotným čidlem, ta se projevila jako důležitý faktor, který ovlivnil výsledky až o  $2,5^\circ\text{C}$ . U každé požadované teploty byly provedeny dvě měření s vypnutým a zapnutým autotuningem. Tento tuning má vliv na celou dobu regulace a konkrétní nastavení se projevilo při teplotě  $200^\circ\text{C}$ . Pro zpracování byla použita centrála HP-34970A (Data acquisition/switch unit, I.Č.:53987) switch AGILENT TECHNOLOGIES 82357A USB/GPIB, dále multiplexer AGILENT 34901A 20 Channel a program matlab 6.

Číslo kanálu	Umístění kanálu	Barva v grafu
03	Relé	Žlutá
04	PT100	Červená
09	Přední strana uprostřed	Zelená
10	Přední strana u středu	Modrá
11	Přední strana vlevo	Světle modrá
12	Přední strana vpravo	Růžová
14	Zadní strana uprostřed	Černá

**Tab. 5: Popis kanálů**

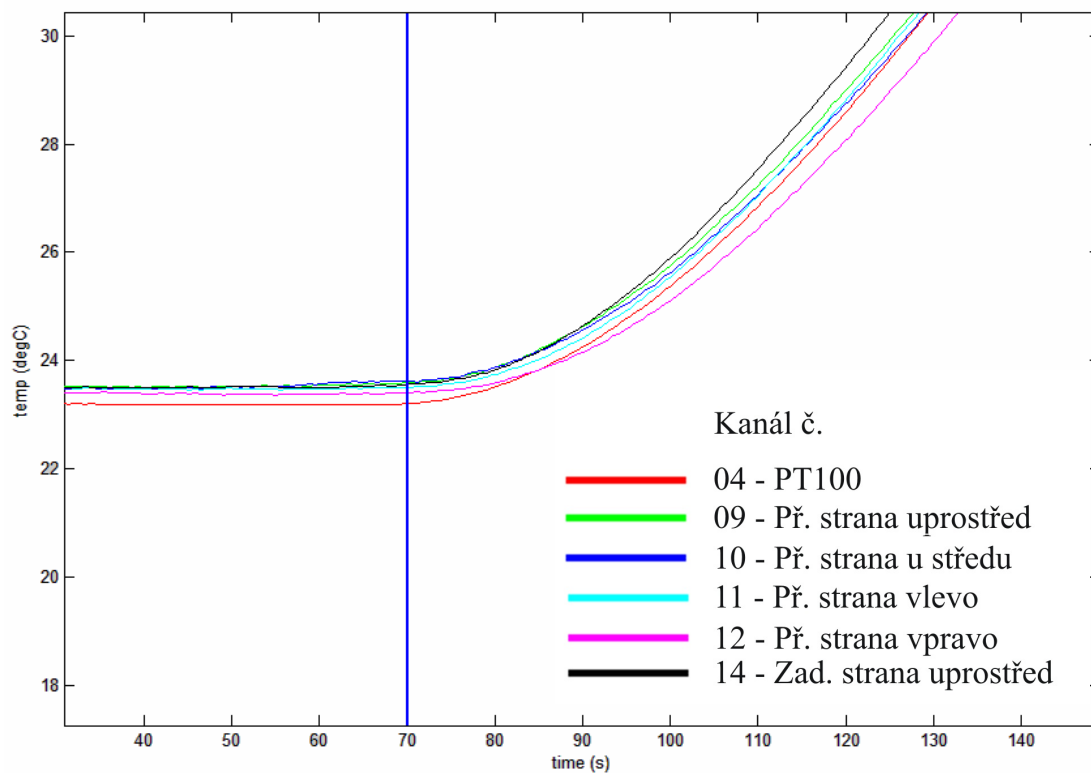
### 3.2.2 Test termostatické desky

První měření probíhalo s použitím teplovodivé pasty. Požadovaná teplota byla 80°C, což je vidět na obr.16. Teplota v místnosti a tudíž i celého přípravku byla 23,5°C. Po nastavení požadované hodnoty došlo k sepnutí topení v čase 70s což je vidět z obr.17. Nejrychleji zareagoval červený kanál 04 (PT 100). Obr.18 znázorňuje překmit pro teplotu 80°C. Svislá modrá přímka naznačuje čas 300s, ve kterém bylo vypnuto topení a vodorovná červená přímka naznačuje požadovanou hodnotu 80°C. Zde je vidět vypnutí topení na 70°C, což znamená, že regulátor vypnul na 87% požadované hodnoty, což mohlo být způsobeno velikostí hystereze (mrtvé pásmo). Po té nechal teplotu překmitnout maximálně o 4°C opět pro červený kanál 04 (PT100).

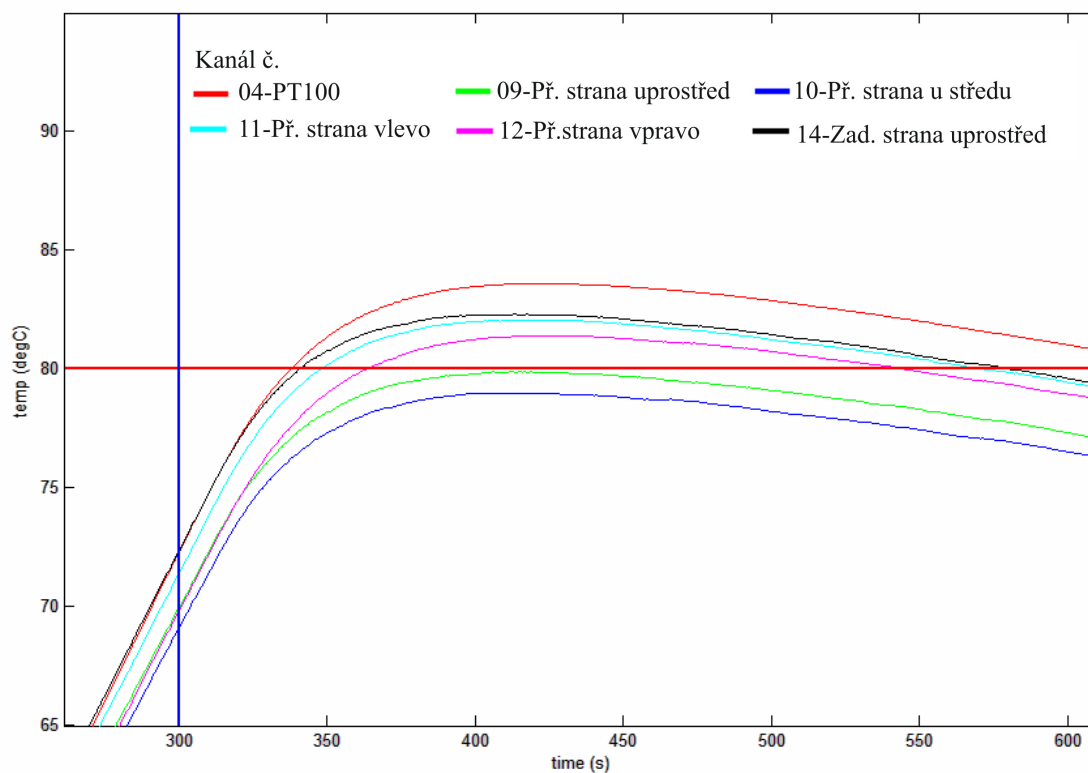


**Obr.16: Průběh regulace na 80 °C bez teplovodivé pasty a bez autotuningu**





Obr.17: Zapnutí regulace bez teplovodivé pasty a bez autotuningu

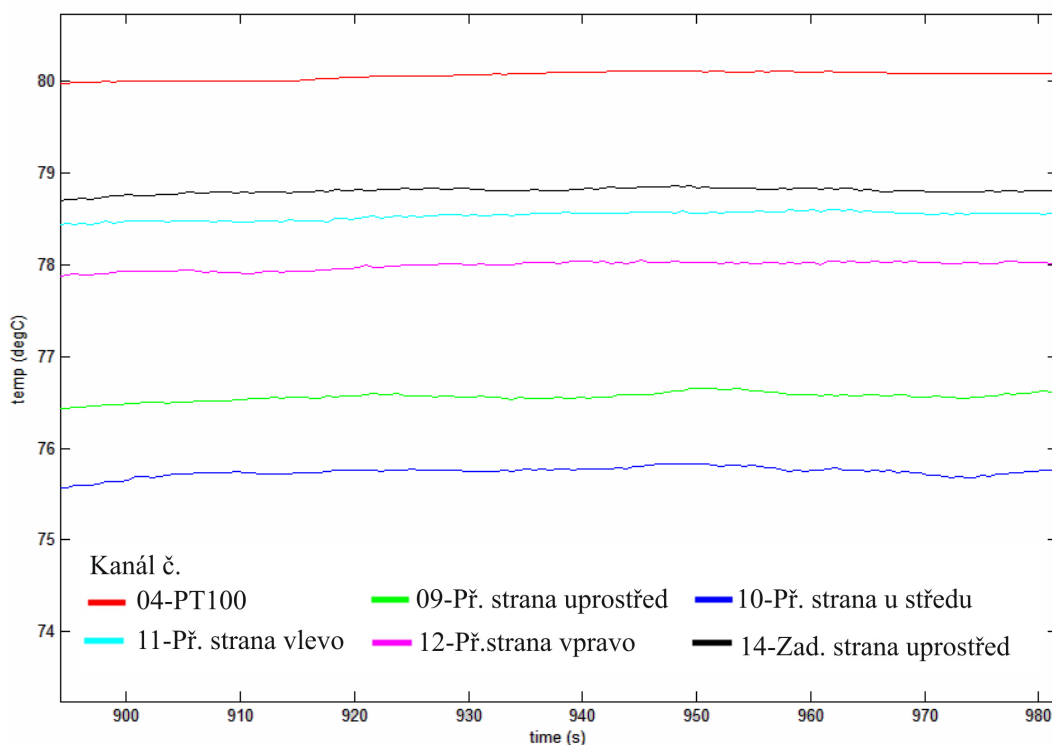


Obr.18: Překmit pro teplotu 80 °C bez teplovodivé pasty a bez autotuningu

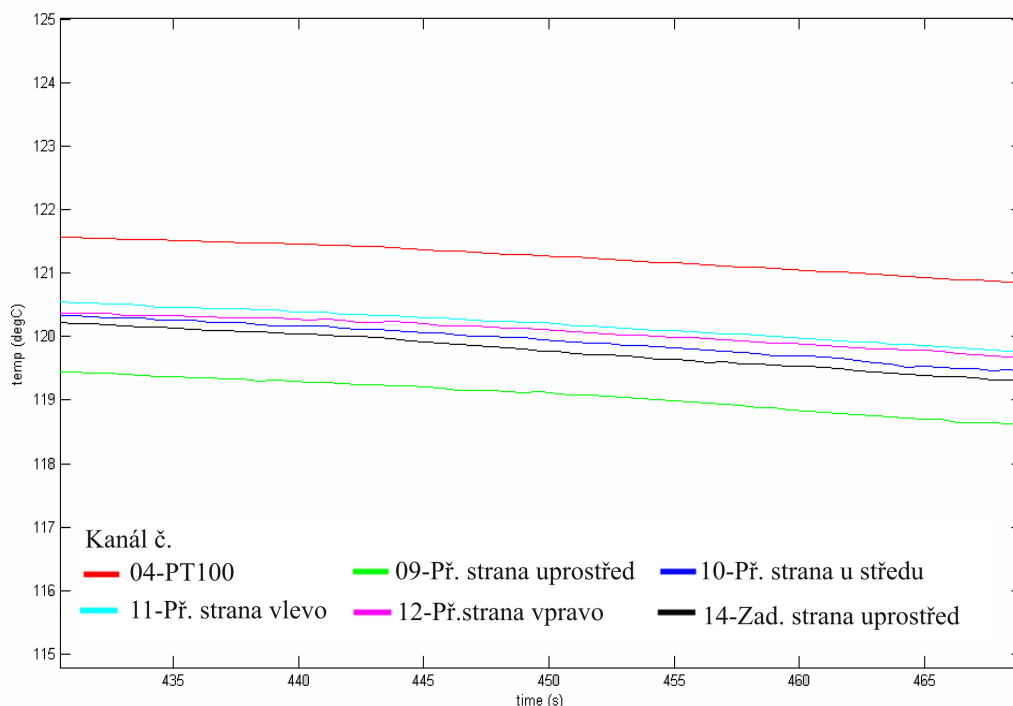
### 3.2.3 Teplotní zkouška vlivu teplovodivé pasty na přesnost měření

Teplotní zkouška vlivu teplovodivé pasty na přesnost měření, byla provedena nejdříve po ustálení na teplotě 80 °C. Na Obr.19 je vidět teplotní rozdíl mezi modrým kanálem 10 (přední strana u středu), a červeným kanálem 04 (PT100), který je 4,5 °C. Poté byla nanесena teplovodivá pasta a měření proběhlo na 120 °C, viz obr. 20. Zde došlo k rozdílu mezi modrým kanálem 09 (přední strana uprostřed) a červeným kanálem 04 (PT100) přibližně o 2 °C.

Z tohoto měření lze usuzovat vliv teplovodivé pasty jako velice důležitý pro přesnost. Ta se zvýšila až o 2,5 °C, což je dáno lepším přenosem tepla v místě styku mezi termostatickou deskou a čidlem. A také došlo ke zjištění vedení tepla po termostatické desce. To se totiž šíří směrem dovnitř. Čidla umístěná u okrajů vykazují vyšší teplotu než ta uprostřed. Tento jev může být způsoben typem přitlačení topení k hliníkové termostatické desce. Pro přitlačení topení byly použity až příliš dlouhé profily typu L, které nedokáží přitlačit topení rovnoměrně, a dochází zde k průhybu. Výsledkem je menší přítlak uprostřed, a tudíž horší vedení tepla v těchto místech.



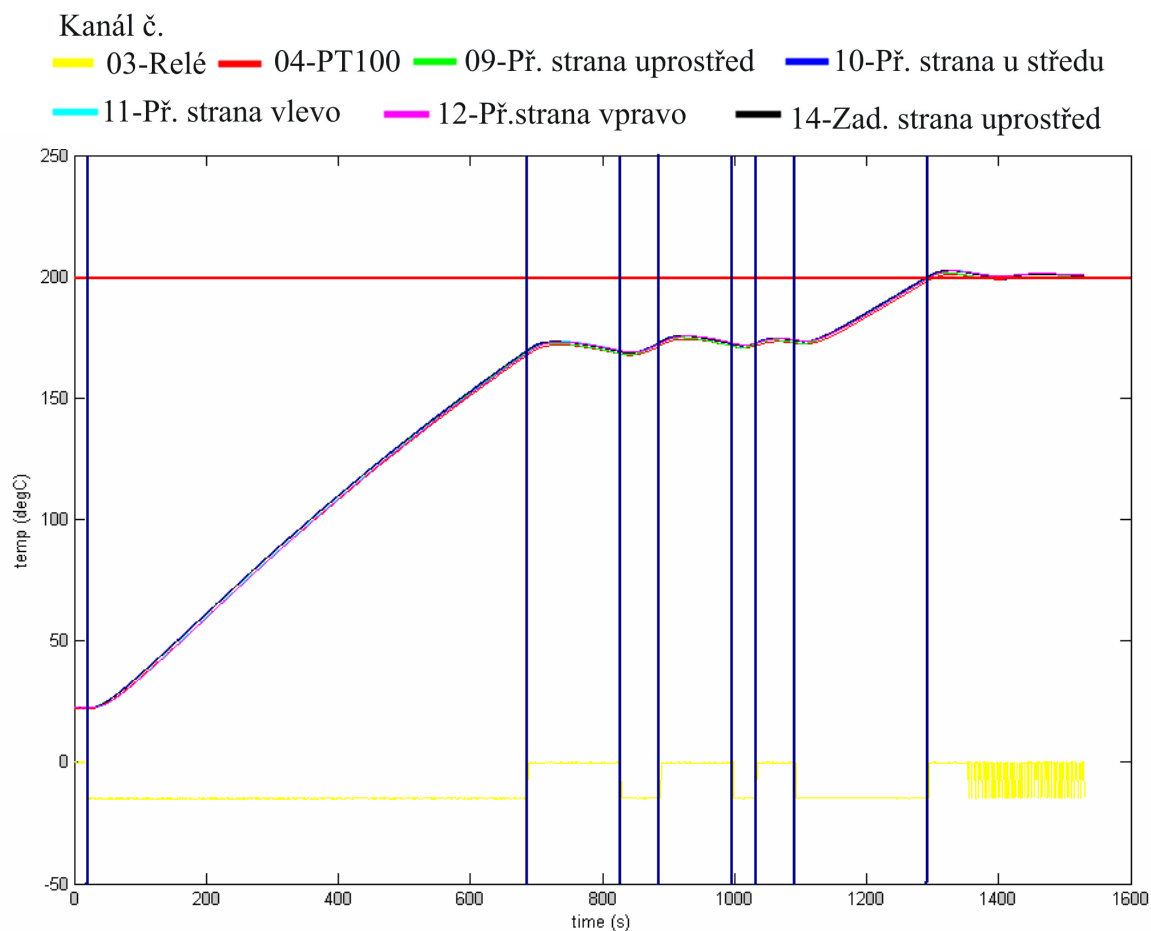
Obr.19: Ustálení regulace při 80 °C bez teplovodivé pasty



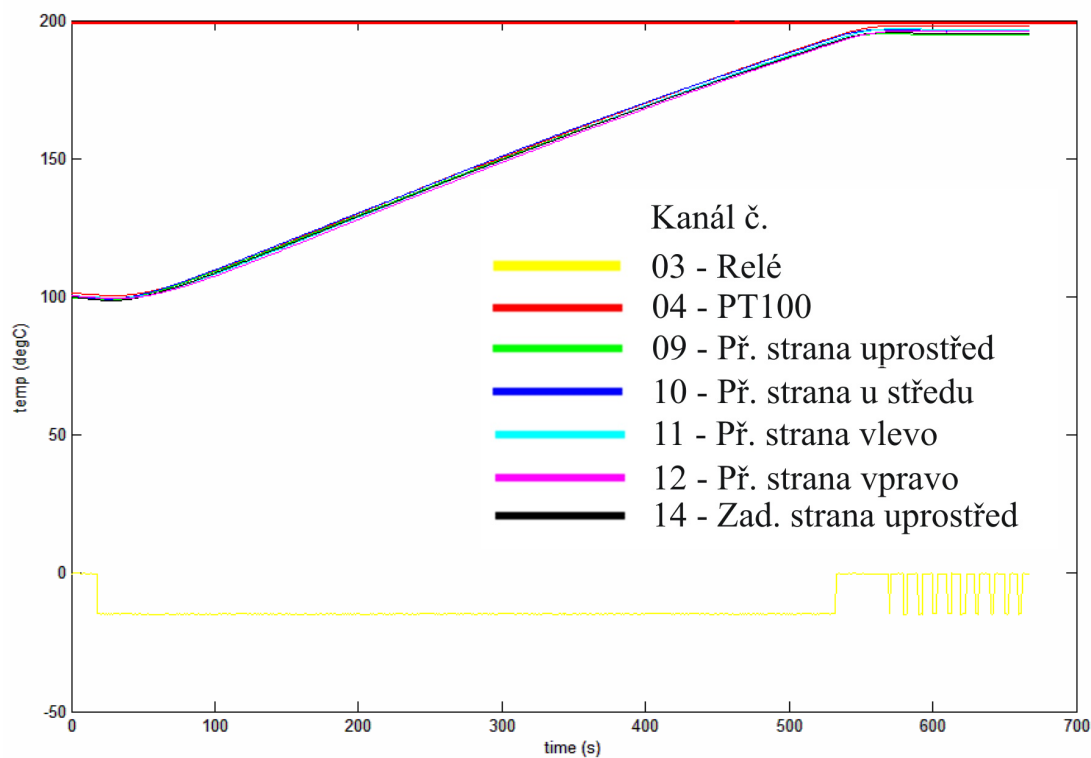
**Obr.20: Ustálení regulace při 120 °C s teplovodivou pastou**

### 3.2.4 Vliv funkce autotune na regulační pochod

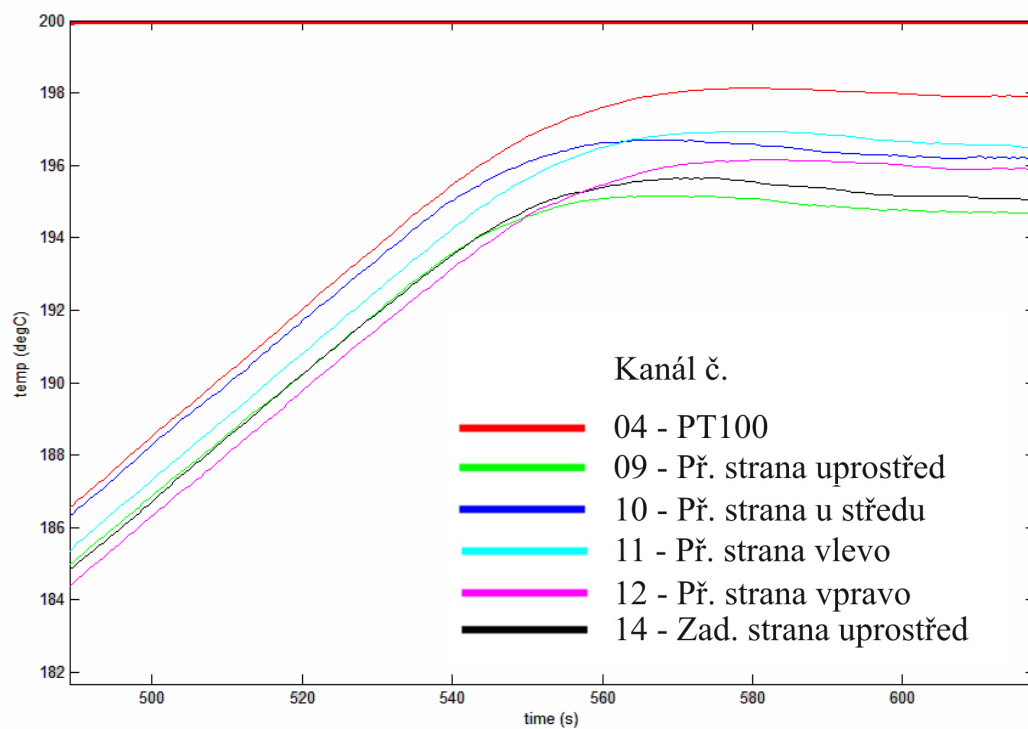
Funkce autotune je samonastavovací režim, který automaticky měří, počítá a nastavuje oblast proporcionality (P), integrační dobu (I), a derivační čas (D). Při samonastavování regulátor tedy provádí proporcionální řízení a určuje vhodné P,I,D hodnoty. Na Obr.21 je vidět první vlastnost autotuningu, a to vypnutí topení o mnoho dříve než je požadovaná hodnota, a vyzkoušení překmitu, v tuto chvíli dochází k přenastavení P,I,D hodnot. Ty jsou pro teplotu 200 °C rovny  $P = 3$ ,  $I = 59$  a  $D = 14$ . Druhou vlastností je překmit maximálně o 2 °C a po té následné kmitání v požadovaném pásmu. Naopak při průběhu regulace s vypnutou funkcí autotune, viz Obr.22 lze pozorovat rychlejší přiblížení k požadované teplotě, ale v případě ohřevu na 200 °C ani nedosáhla regulovaná teplota na požadovanou hodnotu, což je vidět na Obr.23, kde pouze červený kanál 04 (PT100) dosáhl teploty 198 °C. Tento kanál je ovšem z hlediska regulace nejdůležitější, vzhledem k tomu, že je řídicí pro regulátor PID528, a proto lze usuzovat přesnost regulace v tomto případě za velice dobrou i bez funkce autotune. Ovšem to mohlo být způsobeno i předchozím měřením na 120 °C s funkcí Tune, která nastavila hodnoty PID, které po té mohly vyhovovat i pro teplotu 200 °C



**Obr.21: Průběh regulace na 200 ° C a autotuningem**



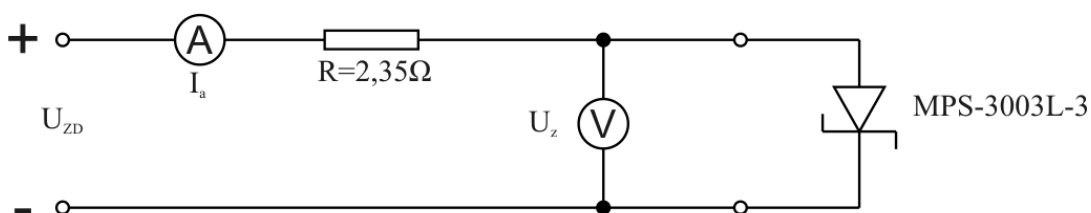
**Obr.22: Průběh regulace na 200 ° C bez autotuningu**



**Obr.23: Překmit regulace na 200 °C bez autotuningu**

### 3.2.5 Vliv teploty na Schottkyho diodu DCSR3060 v propustném směru

V tomto měření byla použita dvojitá dioda DCSR3060, která byla připevněna k termostatické desce šroubem s pružnou matkou z důvodu tepelné roztažnosti. V propustném směru byly naměřeny 4 charakteristiky pro teploty 30, 80, 120 a 150°C. Jako zdroj byl použit MATRIX MPS3003L – 3 a jako voltmetr a ampérmetr dva multimetry typu MASTECH MS8218 AC/DC TRUE MS. Jako sériový odpor byla použita paralelní kombinace dvou odporů TESLA TR553 s výsledným odporem  $2,35\ \Omega$ , viz Obr.24. V propustném směru byla stále zohledňována maximální hodnota výkonu  $P = 0,5\text{W}$ . Podle Obr.25 se pro teplotu 30°C začne zvyšovat proud  $I_a$  na 0,2 mA až při napětí  $U = 0,2995\text{V}$ . a naopak pro teplotu 150°C se při proudu  $I_a = 0,1462\text{mA}$  napětí  $U = 0,1\text{ V}$ . Zvýšení teploty se tedy projeví nižší hodnotou napětí, ve které se začne zvyšovat proud. Lze tedy říci, že s teplotou se zvyšuje strmost diody v propustném směru.



Obr.24: Elektrické zapojení pro měření v propustném směru

$t = 30^\circ\text{C}$

U [V]	0.0000	0.1440	0.2180	0.2503	0.2995	0.3285	0.3370	0.3465	0.3528	0.3548
$I_a$ [A]	0.0000	0.0122	0.0170	0.0540	0.2000	0.6750	0.8570	1.0652	1.2344	1.2928
Uzd [V]	0.00	0.10	0.20	0.30	1.00	2.00	2.50	3.00	3.50	3.60
P [W]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.06	0.22	0.28	0.37	0.43	0.46

$t = 80^\circ\text{C}$

U [V]	0.0000	0.1454	0.1682	0.1872	0.2020	0.2310	0.2500	0.2640	0.2850	0.3000
$I_a$ [A]	0.0000	0.0252	0.0500	0.0900	0.1430	0.3200	0.5000	0.7240	1.1000	1.5000
Uzd [V]	0.00	1.00	0.20	0.30	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00
P [W]	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.07	0.13	0.19	0.31	0.45

$t = 120^\circ\text{C}$

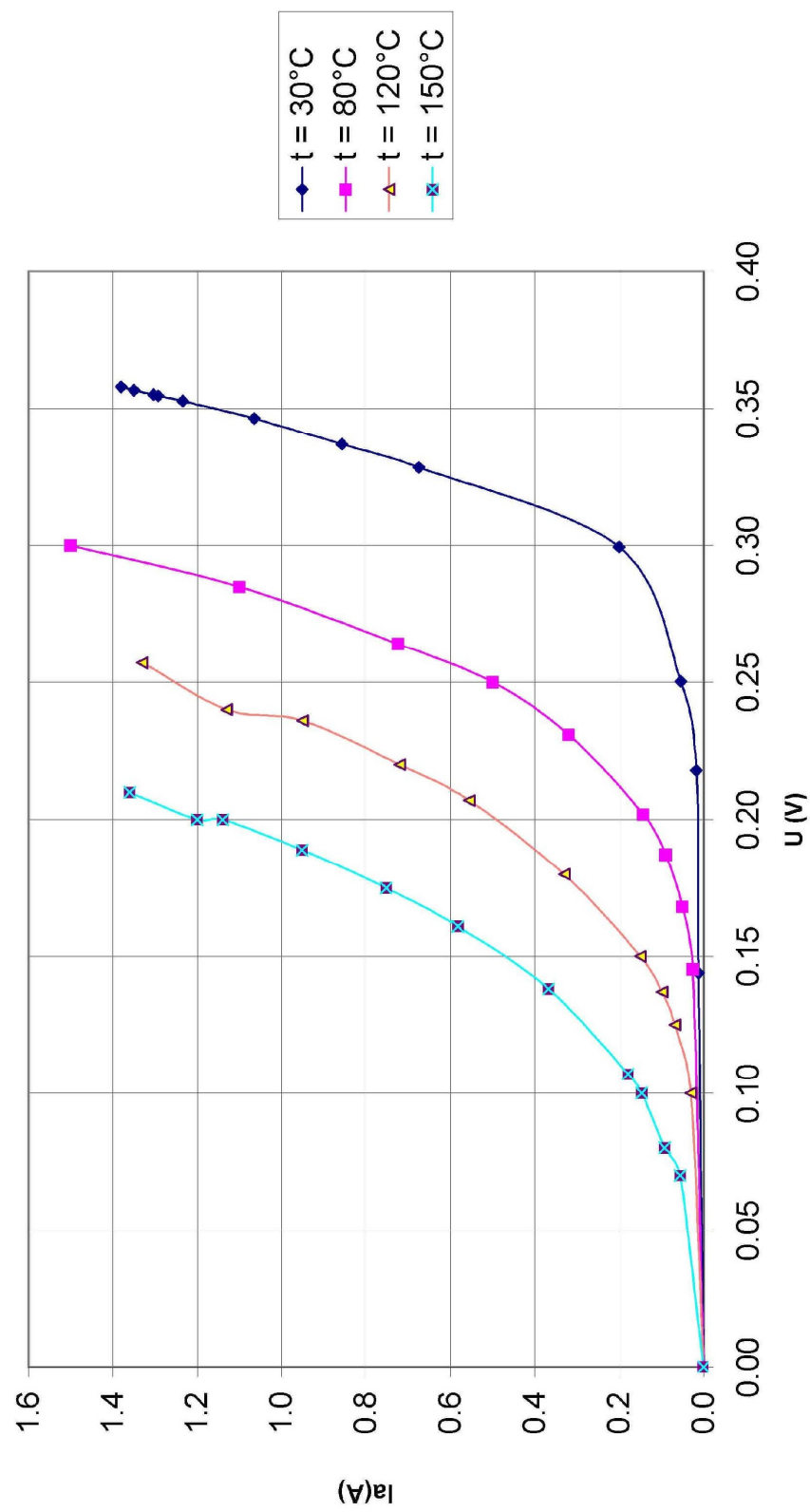
U [V]	0.0000	0.1000	0.1250	0.1370	0.1500	0.1800	0.2070	0.2200	0.2360	0.2400
$I_a$ [A]	0.0000	0.0300	0.0680	0.0980	0.1500	0.3300	0.5550	0.7200	0.9500	1.1300
Uzd [V]	0.00	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
P [W]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.06	0.11	0.16	0.22	0.27

$t = 150^\circ\text{C}$

U [V]	0.0000	0.0700	0.0800	0.1000	0.1070	0.1381	0.1610	0.1750	0.1890	0.2000
$I_a$ [A]	0.0000	0.0557	0.0920	0.1462	0.1790	0.3672	0.5820	0.7520	0.9520	1.1400
Uzd [V]	0.00	0.10	0.20	0.40	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
P [W]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.09	0.13	0.18	0.23

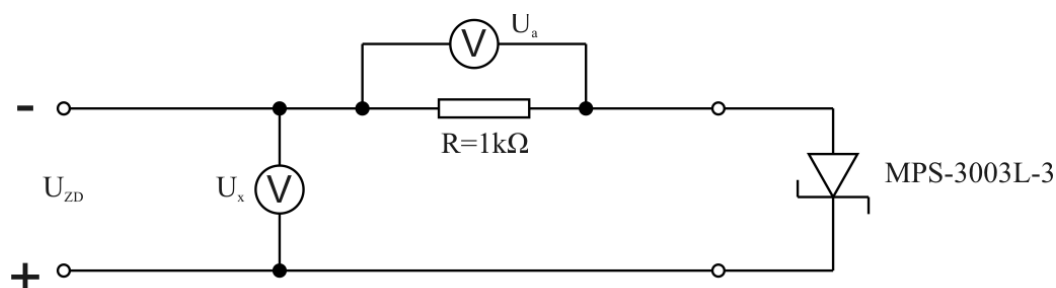
Tab.6: Tabulka pro propustný směr Schottkyho diody

Obr.25: Propustný směr Schottkyho diody DCSR3060



### 3.2.6 Vliv teploty na Schottkyho diodu DCSR3060 v závěrném směru

Toto měření probíhalo na stejné Schottkyho diodě DCSR3060. Pro závěrný směr se měřilo pro teploty 30, 80 a 150°C. Byly zde použity stejné měřicí multimetry a zdroj jako v předešlém měření. Jako sériový odpor zde byl použit 1kΩ, viz. schéma na Obr.26. Proud  $I_z = U_a / R$ . V závěrném směru byla stále zohledňována maximální hodnota výkonu  $P = 0,5W$ , která je znatelná z Obr.27. Z tohoto průběhu je vidět, že při stále stejné hodnotě napětí  $U_z$  na diodě se s teplotou zvyšuje i proud  $I_z$ . Lze tedy říci, že s teplotou se opět zvyšuje strmost diody v závěrném směru.



Obr.26: Elektrické zapojení pro měření v závěrném směru

t = 30°C

Ux [V]	0.00	12.00	32.00	47.00	56.00	62.00
Ua [V]	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Iz [mA]	0.00	-1.00	-2.00	-3.00	-4.00	-5.00
Uz [V]	0.00	-11.00	-30.00	-44.00	-52.00	-57.00
P [W]	0.00	0.01	0.06	0.13	0.21	0.29
Uzd [V]	0.00	6.00	14.00	16.00	23.50	31.30

t = 80°C

Ux [V]	0.00	2.19	9.20	16.50	24.00	31.00	37.14	42.00
Ua [V]	0.00	1.04	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
Iz [mA]	0.00	-1.04	-2.00	-3.00	-4.00	-5.00	-6.00	-7.00
Uz [V]	0.00	-1.15	-7.20	-13.50	-20.00	-26.00	-31.14	-35.00
P [W]	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.13	0.19	0.25
Uzd [V]	0.00	1.00	4.50	8.90	12.00	15.40	18.50	21.10

t = 150°C

Ux [V]	0.00	1.08	2.13	3.15	4.95	7.49	10.58	14.26
Ua [V]	0.00	1.00	2.09	3.03	4.03	5.05	6.01	7.08
Iz [mA]	0.00	-1.00	-2.09	-3.03	-4.03	-5.05	-6.01	-7.08
Uz [V]	0.00	-0.08	-0.04	-0.12	-0.92	-2.44	-4.57	-7.18
P [W]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05
Uzd [V]	0.00	0.50	1.00	1.50	2.30	3.70	5.20	7.00

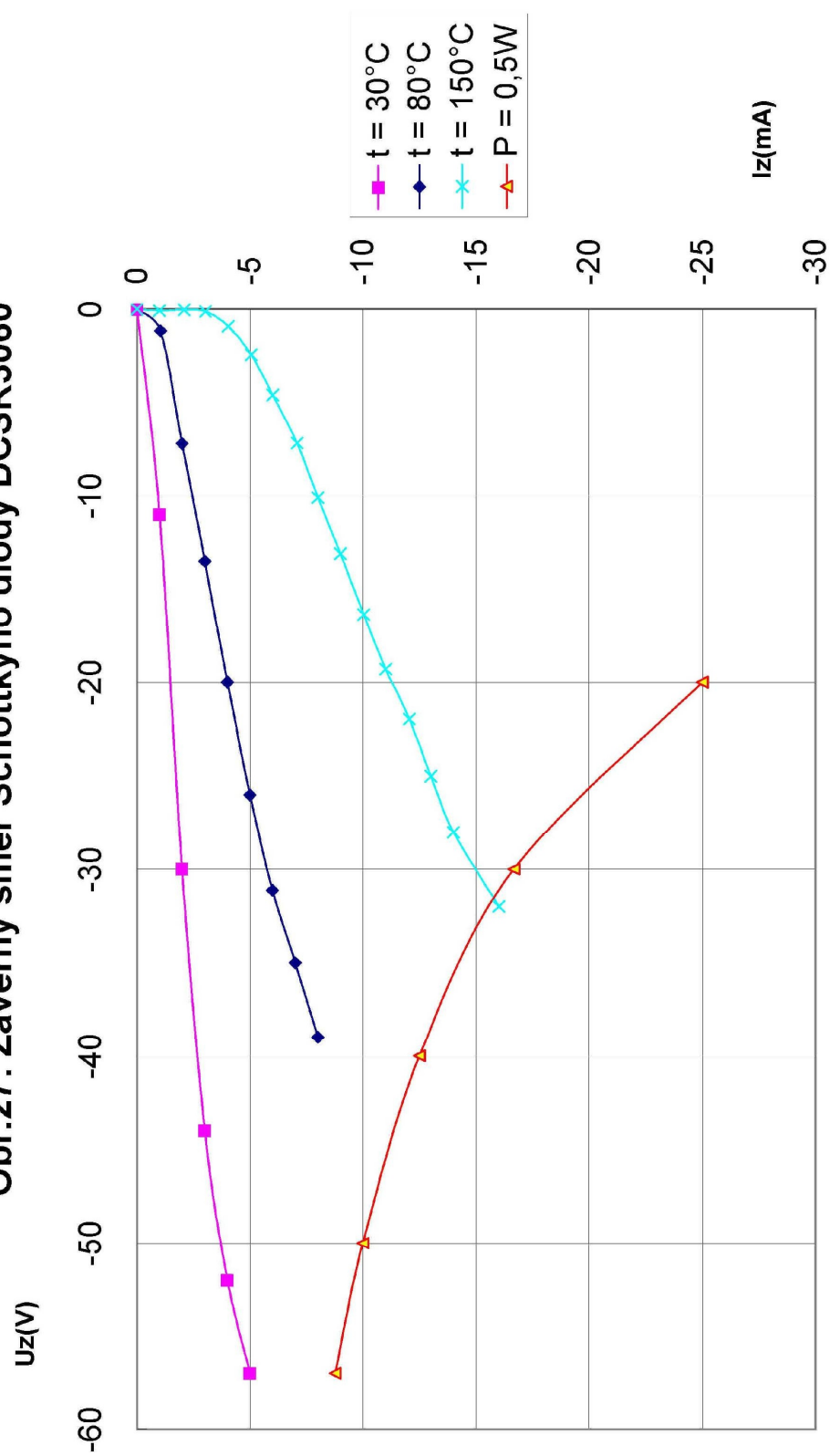
t = 150°C pokračování

Ux [V]	18.09	22.10	26.38	30.30	34.00	38.00	42.00	48.00
Ua [V]	8.00	9.00	10.03	11.00	12.05	13.00	14.00	16.00
Iz [mA]	-8.00	-9.00	-10.03	-11.00	-12.05	-13.00	-14.00	-16.00
Uz [V]	-10.09	-13.10	-16.35	-19.30	-21.95	-25.00	-28.00	-32.00
P [W]	0.08	0.12	0.16	0.21	0.26	0.33	0.39	0.51
Uzd [V]	9.00	11.00	13.10	15.00	17.00	19.00	21.00	24.00

Tab.7: Tabulka pro závěrný směr Schottkyho diody



Obr.27: Závěrný směr Schottkyho diody DCSR3060



## 4 DISKUSE

Hlavním úkolem při konstrukci bylo tepelné oddělení termostatické desky od přístrojové krabice. To je vyřešeno uchycením desky pouze malou plochou čtyř šroubů, upravených pro tuto část zbroušením do kuželovitého tvaru. Mezi termostatickou deskou a přístrojovou krabicí je navíc umístěna skelná tkanina ve 4 vrstvách pro ještě dokonalejší odizolování tepla. Toto tepelné oddělení se povedlo, a výsledkem je teplota přístrojové krabice  $40^{\circ}\text{C}$  při ohřátí termostatické desky na  $200^{\circ}\text{C}$ .

Z měření vlivu teplovodivé pasty na přesnost měření, lze usuzovat použití teplovodivé pasty jako velice důležitý faktor pro přesnost. Ta se zvýšila až o  $2,5^{\circ}\text{C}$ , což je dáno lepším přenosem tepla v místě styku mezi termostatickou deskou a čidlem. A také došlo ke zjištění vedení tepla po termostatické desce. To se totiž šíří směrem dovnitř. Čidla umístěná u okrajů vykazují vyšší teplotu než ta uprostřed. Tento jev může být způsoben typem přitlačení topení k hliníkové termostatické desce. Pro přitlačení topení byly použity až příliš dlouhé profily typu L, které nedokáží přitlačit topení rovnoměrně, a dochází zde k průhybu. Výsledkem je menší přitlak uprostřed, a tudíž horší vedení tepla v těchto místech. Řešením by mohlo být použití příčného seřazení přitlačných profilů, na místo podélného.

V dalším měření u funkce autotune došlo k vypnutí topení o mnoho dříve než je požadovaná hodnota, a vyzkoušení překmitu, v tuto chvíli dochází k přenastavení P,I,D hodnot. Ty jsou pro teplotu  $200^{\circ}\text{C}$  rovny  $P = 3$ ,  $I = 59$  a  $D = 14$ . Druhou vlastností je překmit maximálně o  $2^{\circ}\text{C}$  a po té následné kmitání v požadovaném pásmu. Naopak při průběhu regulace s vypnutou funkcí autotune, lze pozorovat rychlejší přiblížení k požadované teplotě, ale v případě ohřevu na  $200^{\circ}\text{C}$  ani nedosáhla regulovaná teplota na požadovanou hodnotu. Lze usuzovat přesnost regulace v tomto případě za velice dobrou i bez funkce autotune. Ovšem to mohlo být způsobeno i předchozím měřením na  $120^{\circ}\text{C}$  s funkcí Tune, která nastavila hodnoty PID, které po té mohly vyhovovat i pro teplotu  $200^{\circ}\text{C}$ .

V posledních měření vlivu teploty na Schottkyho diodu DCSR3060 v propustném směru se zvýšení teploty projeví nižší hodnotou napětí  $U_z$ , ve které se začne zvyšovat proud  $I_z$ . Lze tedy říci, že s teplotou se zvyšuje strmost diody v propustném směru. V závěrném směru byla stále zohledňována maximální hodnota výkonu  $P = 0,5\text{W}$ . Bylo zjištěno, že při stále stejné hodnotě napětí  $U_z$  na diodě se s teplotou zvyšuje i proud  $I_z$ . Lze tedy říci, že s teplotou se opět zvyšuje strmost diody v závěrném směru.

## 5 ZÁVĚR

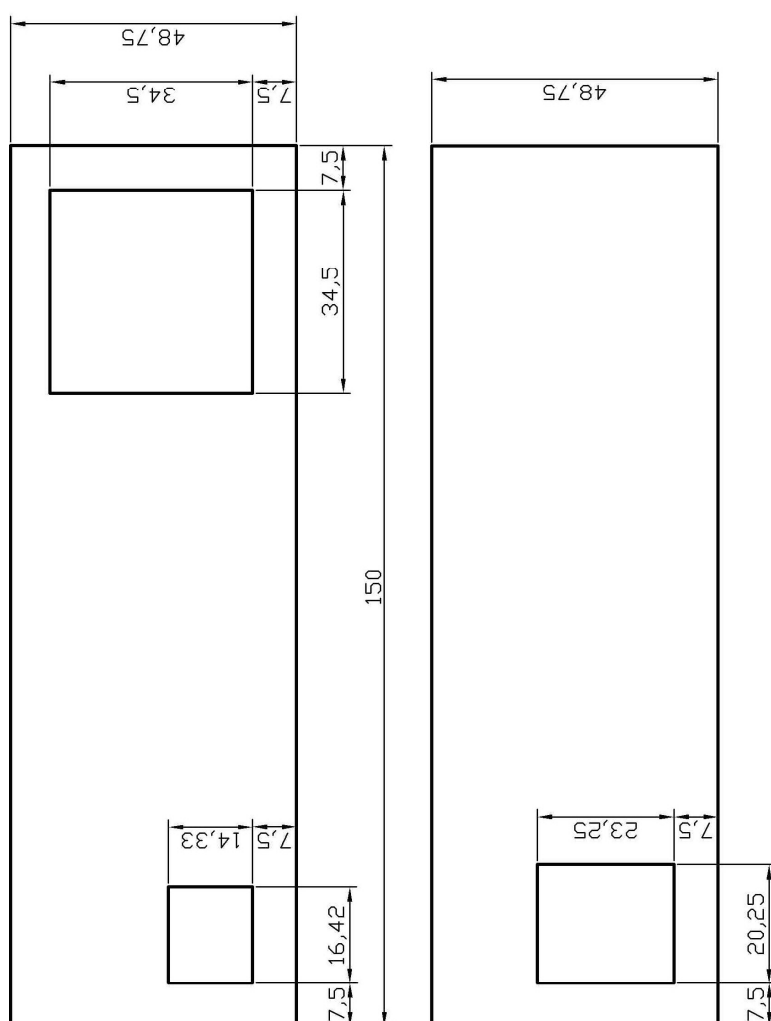
Výroba přípravku proběhla podle daných kritérií. Byly změřeny časové teplotní charakteristiky pro termočlánky a odporová čidla PT100. U polovodičové Schottkyho diody byly změřeny teplotní charakteristiky v propustném a závěrném směru. PID regulátor 528 se potvrdil jako vhodný pro tuto aplikaci. Další zdokonalení tohoto přípravku by mohlo být měření teplotních závislostí elektronických prvků a dílů pro teploty nad 200°C. To by ovšem znamenalo jinou konstrukci a jiné oddělení teplot termostatické desky a přístrojové krabice.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Ing. Jan CHLEBNÝ A KOL *Automatizace a automatizační technika 3 : Prostředky automatizační techniky*. [s.l.] : [s.n.], 2009. 296 s.
- [2] *Co je co* [online]. 1999-2009 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z WWW: <[http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id\\_desc=96672&s\\_lang=2&title=teplota](http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=96672&s_lang=2&title=teplota)>.
- [3] *Seznam encyklopedie* [online]. 1996-2009 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/178693-teplota>>.
- [4] *Seznam encyklopedie* [online]. 1996-2009 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/186860-kelvinova-stupnice>>.
- [5] *Seznam encyklopedie* [online]. 1996-2009 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/8362-celsiova-stupnice>>.
- [6] *Odporové snímače teploty* [online]. 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://dt.fme.vutbr.cz/measure/Senzor/CI-Pt100.htm>>.
- [7] *Kovové odporové senzory teploty* [online]. 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <[http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/kovove\\_snimace\\_templ.htm](http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/kovove_snimace_templ.htm)>.
- [8] *Automatizace - snímače* [online]. 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.snimace.xf.cz/odporove-snimace-teploty.php>>.
- [9] *Technická literatura BEN* [online]. 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://shop.ben.cz/cz/980005-senzor-teploty-pt100-crz-2005-100-b-1ni.aspx>>.
- [10] *Automatizace - snímače* [online]. 2009 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.snimace.xf.cz/polovodicove-snimace-teploty.php>>.
- [11] *Elektrotechnická fakulta ČVUT* [online]. 2009 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/kulha/X34SES+SEE/Teplo%20senzory1.ppt>>.
- [12] *Fakulty mechatroniky IMS* [online]. 2009 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <[www.mti.tul.cz/files/dms/05\\_teplota.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/dms/05_teplota.ppt)>.
- [13] *Termoelektrické snímače teploty* [online]. 2009 [cit. 2009-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www-dt.fme.vutbr.cz/measure/Senzor/CI-TerCI.htm>>.
- [14] *Snímače tepelných veličin* [online]. 2009 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <[http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/10\\_teplota.pdf](http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/10_teplota.pdf)>.
- [15] *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2009 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>>.

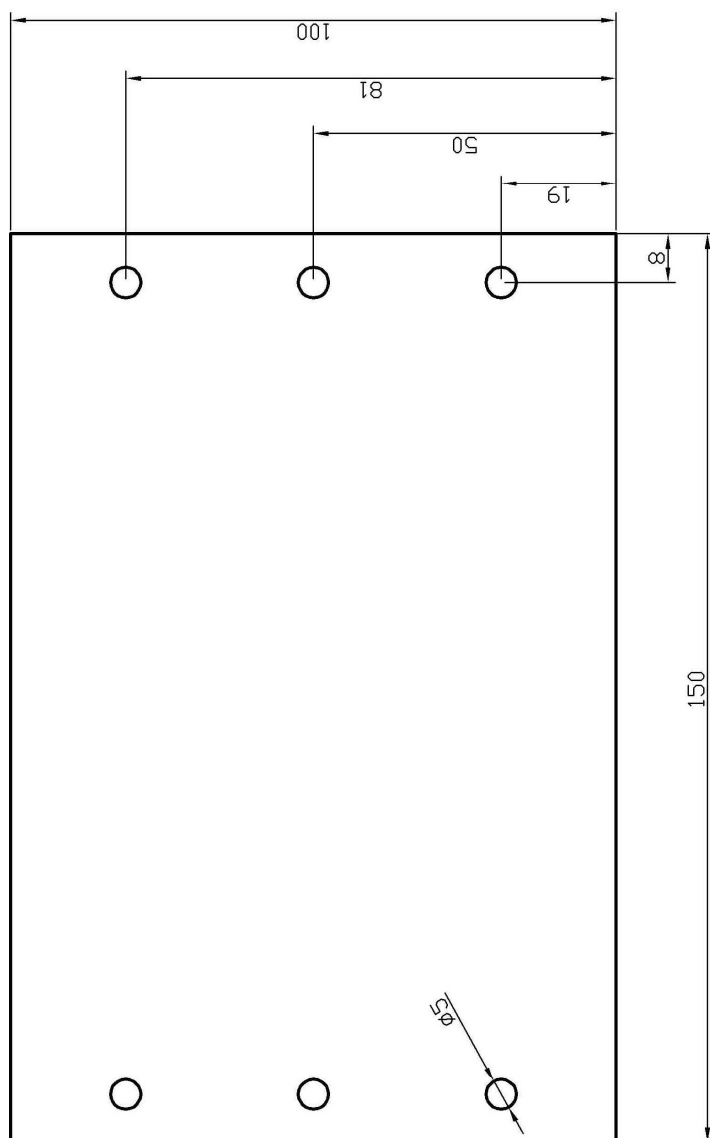
- [16] *Seznam encyklopedie* [online]. 1996-2009 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW:  
<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/508255-pyrometrie>>.
- [17] *Bezdotykové teploměry* [online]. 2009 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW:  
[http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/Bezdotykove\\_teploмеры.pdf](http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/Bezdotykove_teploмеры.pdf)>.
- [19] *Wikipedie* [online]. 2008 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplotn%C3%AD\\_sou%C4%8Dinitel\\_odporu](http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplotn%C3%AD_sou%C4%8Dinitel_odporu)>.
- [19] *Radhesh wordpress* [online]. 2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW:  
<http://radhesh.files.wordpress.com/2008/05/pid.jpg>>.
- [20] *THL systems* [online]. 2009 [cit. 2009-05-09]. Dostupný z WWW:  
<http://www.thlsystems.cz/download/CropicoRS3Normaly.pdf>>.
- [21] *Obchod.hw* [online]. 2009 [cit. 2009-05-18]. Dostupný z WWW:  
<http://obchod.hw.cz/?cls=stoitem&stiid=35758> >.
- [22] *GM electronic* [online]. 2009 [cit. 2009-05-18]. Dostupný z WWW:  
<http://www.gme.cz/cz/index.php?product=635-025>>.
- [23] *Wikipedie* [online]. 2009 [cit. 2009-05-23]. Dostupný z WWW:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wiens\\_law.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wiens_law.svg)>.
- [24] *Návod k obsluze pro bezdotykový teploměr GIM530MS Greisinger electronic GmbH* [cit. 2009-05-23].
- [25] *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2009 [cit. 2009-05-23].  
Dostupný z WWW: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F3/F3k34-sprg.htm>>.
- [26] *Jonatan* [online]. 2009 [cit. 2009-05-23]. Dostupný z WWW:  
<http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/images/jednod2.jpg>>.
- [27] *Návod pro PID 528* [online]. 2009 [cit. 2009-05-23]. Dostupný z WWW:  
[http://www.relko.cz/katalogy%2Fksd%2Fselectron%2Fnavody%2Fpid528\\_navod.pdf](http://www.relko.cz/katalogy%2Fksd%2Fselectron%2Fnavody%2Fpid528_navod.pdf) >.
- [28] *Seznam encyklopedie* [online]. 1996-2009 [cit. 2009-05-24]. Dostupný z WWW:  
<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/193372-schottkyho-diody>>.

## Přílohy:



INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	TU LIBEREC	
ZN. MAT.	MATERIAL	ROZM. - POLOT.	ROZMER	POLOTOVAR	Plech
Č. POM. ZAŘ.					
VYPR. Jarošlav Antoš		NORM. REF.			
PŘEZK.					
TECHN.		SCHVÁLIL			
NÁZEV	Přední a zadní panel				
BP-FM-2009					List

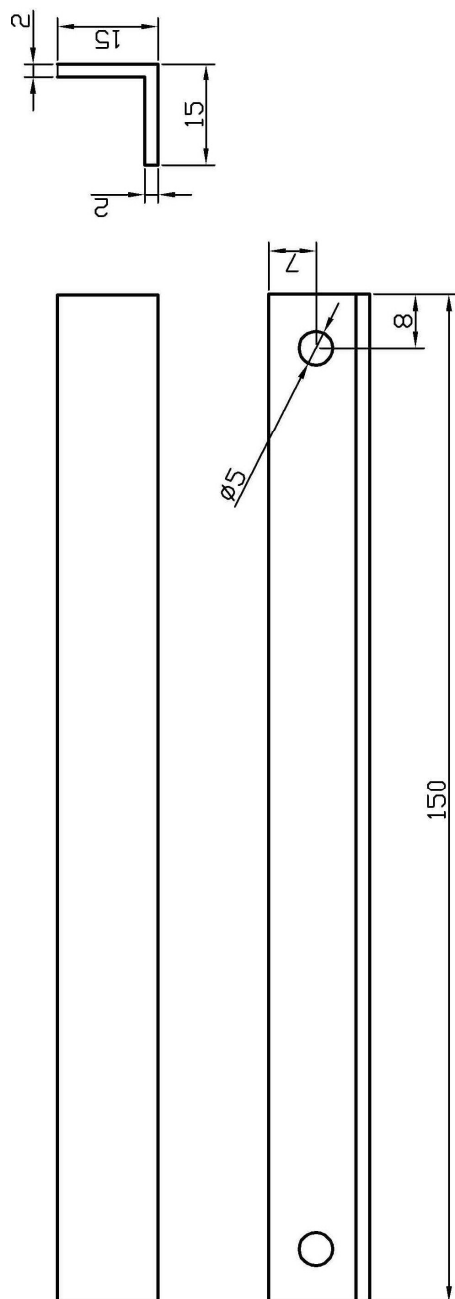
Příloha č.1: Přední a zadní panel



**Příloha č.2: Termostatická deska**

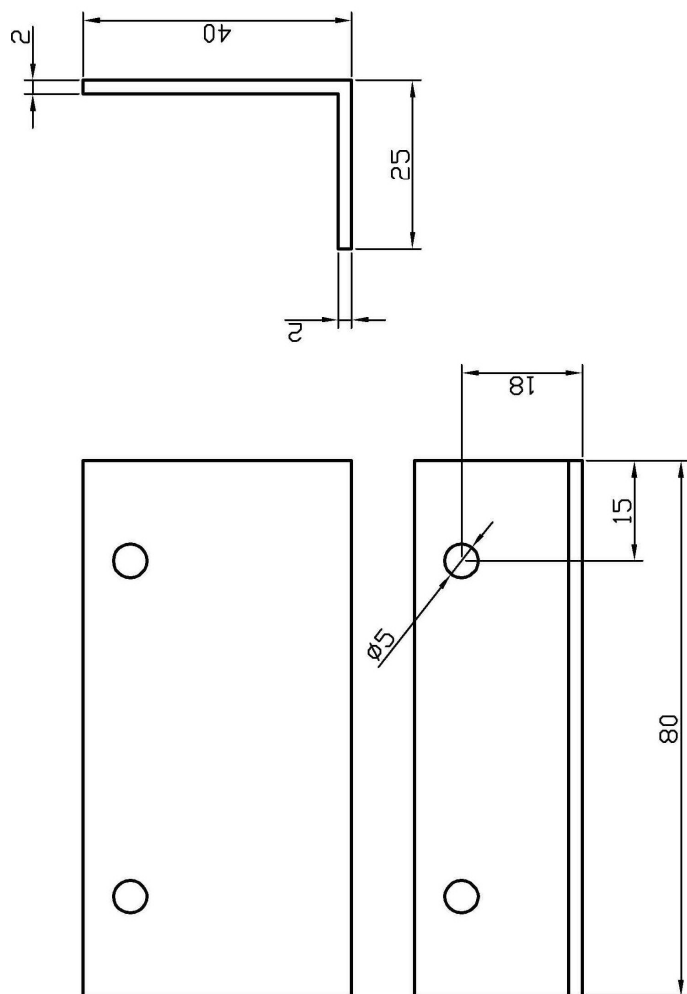
INDEX		ZMENA		TU LIBEREC	
MATERIAL		ROZMER		HMOTNOST kg	
ROZM.-POLOT.		POLOTOVAR		MÉR. 1:1	
Č. POM. ZAŘ.		Hliník		TR. Č.	
VYPR. Jaroslav Antoš		NORM.REF.		Č.KUSOVNÍKU	
PŘEZK.		SCHVÁLIL		Č.V.	
TECHN.		STARÝ V.		BP-FM-2009	
NÁZEV		Termostatická deska		Listů	
				List	





**Příloha č.3: Přítlačný profil**

INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	TU LIBEREC	
ZN. MAT.	MATERIAL	HMOTNOST kg		MĚŘ.	1:1
ROZM.-POLOT.	ROZMER	Hliník		TR. Č.	
Č. POM. ZAŘ.	POLOTOVAR	POZN.		Č.KUSOVNÍKU	
VYPR. Jaroslav Antoš	NORM.REF.	Č. SN.			
PŘEZK.		STARÝ V.	Č.V.		
TECHN.	SCHVÁLIL				
NÁZEV	Přítlačný profil				
BP-FM-2009			List		



**Příloha č.4: Profil pro držení desky**

INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	TU LIBEREC	
ZN. MAT.	MATERIAL	HIKLIK	HMOTNOST kg	MĚŘ.	1:1
ROZM.-POLOT.	ROZMER	POLOTOVAR	Č. SN.	TŘ. Č.	
Č. POM. ZAŘ.	NORM.REF.		POZN.	Č.KUSOVNÍKU	
VYPR. Jaroslav Antoš			STARÝ V.	Č.V.	
PŘEZK.	SCHVÁLIL				
TECHN.					
NÁZEV	<div> <div>BP-FM-2009</div> <div> <div>Listů</div> <div>List</div> </div> </div>				

### Nastavování parametrů PID 528, před nastavením stlač ▲ a ▼ na 3 sec.

Horní display	Dolní display	Stlačit tlačítko	Název	Popis
ANL	00	Stlač ▼▲ na 3 sec	*manuální reset	Programovatelný od -99,9 do 99,9 °C po 0,1 °C
LOC	0000	stlač ▲	*kód pro uzamčení nastavení - lock	uživatelé nastavitelný
INP	J	stlač ▲	vstupní čidlo input	Vyber typ vstupního čidla : J, K, T, R, S, RTD (Pt100)
RESL	I	stlač ▲	rozlišení displaye resolution	Rozlišení 0,1 °C nebo 1 °C , platné jen pro J, K, RTD ( Pt 100 )
HIGH	0750	stlač ▲	horní hranice high level	maximální hodnota pro nastavení teploty
TUNE	OFF	stlač ▲	*samonastav. režim – tune	Volba samonastavovacího režimu – je-li v OFF, regulátor bude jednoduchý PID regulátor s P,I,D nastavením dle uživatele; je-li ON , je nastavení děláno samotným regulátorem, není zapotřebí žádného nastavování
Pb	0 100	stlač ▲	pásmo proporcionality propor. band	Pásmo proporcionality je volitelné od 0 – 400 °C. Pb = 00 způsobí, že regulátor pracuje v režimu ON/OFF
INT	120	stlač ▲	integrační doba integr. time	Integrační doba je nastavitelná od 0 do 3600 sec
DER	030	stlač ▲	derivační doba derivat. time	Derivační čas je nastavitelný od 0 do 200 sec
CYC	020	stlač ▲	doba cyklu cycle time	Doba cyklu pro pásmo proporcionality pro relé 1
HYS 1	0 10	stlač ▲	hystereze hysteresis of Set 1	Platné jen pro režim ON/OFF – od 0,1 do 99,9
RLY 1	RE	stlač ▲	výstupní mód relé 1 relay 1	Vyber reverse „re“ pro topení, a forward „fd“ pro chladicí aplikace
RLY 2	RE	stlač ▲	výstupní mód relé 2 relay 2	Vyber reverse „re“ pro topení, a forward „fd“ pro chladicí aplikace
SET 2	ABS	stlač ▲	nastav teplotu 2	Absolutní / odchylka Přepínej mezi Abs / dEU režimem stlačením ▲ a ▼
SET 2	0000	stlač ▲	nastav teplotu 2	-99 do maximální hodnoty čidla pro 1°C rozlišení, -99,9 až 999,9 pro 0,1 °C rozlišení
HYS 2	0 10	stlač ▲	hystereze hysteresis of Set 1	0,1 až 99,9 °C

L-SP	YES	stlač ▲	Nastav zámek <b>Lock set point</b>	Nastav zámek - přepínej mezi YES / NO režimem stlačením ▲ a ◻
RESET	NO	stlač ▲	<b>RESET</b>	Resetování všech parametrů - přepínej mezi YES / NO režimem stlačením ▲ a ◻

stlač ◻ a ▼ nebo ◻ a ▲ pro změnu parametru,  
 stlač ▲ a ▼ na 3 sec. pro ukončení programování !  
 stlač ◻ a ▼ nebo ▲ pro změnu požadované teploty ( mimo nastavování parametrů)

#### Příloha č.5 Nastavení PID 528